



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Sécurité Industrielle
Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

**Production des produits bio à partir des déchets , destinés
à l'industrie pharmaceutique , para-pharmaceutique et
cosmétique.**

Présenté et soutenu publiquement par :

CHIKH Fetoua Islem & Bergane Wassila

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mechken Amel			Président
Derias Fatma Zahra			Encadreur
Islam Hadj Mohamed Guitarni			Examineur

Juin 2025

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets organiques, notamment le marc de café et les noyaux de dattes, pour la production de charbon actif. Les deux biomasses ont subi des traitements thermiques (pyrolyse, activation, post-pyrolyse) afin d'obtenir un matériau adsorbant performant. Plusieurs techniques de caractérisation ont été utilisées : FTIR, ATG, MEB, DRX et BET. Les résultats ont montré une bonne stabilité thermique, une structure amorphe, une porosité développée, et la présence de groupes fonctionnels actifs. Le charbon actif obtenu présente des propriétés comparables à celles des charbons commerciaux, ouvrant des perspectives d'applications environnementales telles que la dépollution des eaux.

Mots-clés : Valorisation, marc de café, noyaux de dattes, charbon actif, pyrolyse, activation, FTIR, ATG, MEB, DRX, BET.

Abstract

This research aims to valorize organic waste, specifically coffee grounds and date pits, for the production of activated carbon. Both biomasses underwent thermal treatments (pyrolysis, activation, post-pyrolysis) to develop an efficient adsorbent material. Various characterization techniques were employed, including FTIR, TGA, SEM, XRD, and BET. The results revealed good thermal stability, an amorphous carbon structure, developed porosity, and the presence of functional groups. The activated carbon obtained exhibited properties comparable to commercial-grade carbons, making it a promising candidate for environmental applications such as water purification.

Keywords: Valorization, coffee grounds, date pits, activated carbon, pyrolysis, activation, FTIR, TGA, SEM, XRD, BET.

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تثمين النفايات العضوية، وخاصة قفل القهوة ونوى التمر، لإنتاج الفحم النشط. خضعت هذه المخلفات لمعالجات حرارية (التحلل الحراري، التنشيط، التحلل الثانوي) من أجل الحصول على مادة مازة فعالة. تم اعتماد عدة تقنيات تحليلية FTIR، ATG، MEB، DRX و BET. أظهرت النتائج ثباتاً حرارياً جيداً، بنية كربونية غير متبلورة، مسامية متطورة، ووجود مجموعات وظيفية نشطة. يتمتع الفحم النشط المحضر بخصائص مشابهة للفحم التجاري، مما يجعله مناسباً لتطبيقات بيئية مثل تنقية المياه.

الكلمات المفتاحية: التثمين، قفل القهوة، نوى التمر، الفحم النشط، التحلل الحراري، التنشيط، FTIR، ATG، MEB، DRX، BET.

Remerciement

Louange à Dieu, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Madame Derías Fatma Zohra**, mon encadrante au sein de l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, pour sa bienveillance, sa disponibilité et ses conseils pertinents tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son accompagnement constant et son expertise ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.*

*Mes sincères remerciements vont également aux **membres du jury**,
Madame Mechken Amel*

Et

***Monsieur Islam Hadj Mohamed Guítarní**,
qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce mémoire.*

Je les remercie pour le temps qu'ils y consacreront, ainsi que pour leurs remarques constructives qui ne manqueront pas d'enrichir ce travail.

Je remercie également l'ensemble des enseignants de l'Institut pour la qualité de l'enseignement reçu tout au long de ma formation, ainsi que pour leur engagement dans notre encadrement académique et professionnel.

À toutes et à tous,

Merci infiniment.

Dédicace

*C'est avec une grande joie que je dédie ce modeste mémoire,
à tous mes proches particulièrement :*

*À mon seul et unique abri d'enfance, à celle qui n'a jamais
cessé de me lancer l'appel d'amour et de tendresse, de me
soutenir dans les moments difficiles, la plus proche de mon
cœur :*

*À ma très chère mère : **Wahiba.***

*À celui qui m'a guidé vers la voie de la réussite, qui fait
l'impossible pour me donner le courage et qui s'est sacrifié
pour me permettre de poursuivre mes études jusqu'à ce jour :*

*Mon très cher père : **Hamid.***

*Mes parents, aucun mot ne saurait témoigner de l'étendue
des sentiments que nous éprouvons à leur égard. Nous
souhaitons que Dieu leur préserve une longue vie.*

*À celui dont le soutien constant, la compréhension et
l'encouragement m'ont accompagnée tout au long de ce
parcours académique :*

*Mon époux : **Hichem***

*À celle avec qui j'ai grandi, complice de toujours, soutien
discret mais essentiel :*

*Ma sœur : **Ines***

À celui dont la présence rassure et encourage :

*Mon frère : **Abdelkader.***

*À celle qui a été à mes côtés dans chaque étape de ce travail,
dans les bons comme dans les moments de doute :*

*Ma binôme **Wassila.***

*Et à celle qui a su m'encadrer avec bienveillance, rigueur et
patience :*

*Mon encadrante : **Mme.Derías.***

Fetoua

Dédicace

Louange à Allah, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, qui m'a guidée et soutenue à chaque étape de ce long chemin.

Je dédie ce mémoire, avec une immense gratitude et un profond respect :

À mes parents adorés, véritables piliers de ma vie, qui ont toujours cru en moi, même lorsque moi-même je doutais. Leur amour inconditionnel, leurs sacrifices silencieux et leurs encouragements constants m'ont portée jusqu'ici. Merci d'avoir été là.

À Madame Derias Fatma Zahra, mon encadrante, dont la rigueur scientifique s'est accompagnée d'une grande bienveillance humaine. Merci pour votre écoute attentive, vos conseils avisés, votre confiance. Ce travail porte l'empreinte de votre accompagnement éclairé.

À mes frères Ahmed et Sedik, pour leur soutien fraternel, leur humour apaisant et leur constante présence à mes côtés.

À mon cousin Bergane Cheikh, pour sa présence apaisante et ses mots justes dans les moments de doute.

À mes cousines chères, et tout particulièrement Fatima et Meriem, pour leurs mots doux et leur affection fidèle. Merci d'avoir toujours été là, même à distance.

À mes tendres tantes, avec une pensée particulière pour Sabrina, dont l'affection, les gestes discrets et les attentions m'ont profondément touchée.

À mon oncle Kader et sa femme Nehid, pour leur gentillesse, leur générosité et leur regard fier qui m'a tant motivée.

À ma binôme Fetoua, avec qui j'ai partagé cette aventure intellectuelle et humaine. Merci pour ta rigueur, ton engagement et ta complicité tout au long de ce travail.

À mon amie Sabrina, une âme précieuse à mes côtés, dont l'amitié fidèle et lumineuse m'a offert du réconfort dans les moments difficiles. Merci d'avoir été là.

Et enfin, à toute la famille Bergane et Bechikh, pour l'amour, le respect et la chaleur qu'ils m'ont toujours témoignés. Vous avez chacun contribué, à me pousser vers le meilleur de moi-même.

Ce mémoire est plus qu'un travail académique. C'est le fruit d'un parcours, d'un soutien collectif et d'un amour partagé. À vous tous, je dis du fond du cœur : merci.

Wassila

Liste des abréviations

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché
AGT : Analyse Gravimétrique Thermique (souvent utilisé comme synonyme ou variante de TGA/ATG)
BASF : Badische Anilin- und Soda-Fabrik (géant de la chimie, fournisseur d'ingrédients pour la cosmétique)
BET : Brunauer–Emmett–Teller (Méthode d'analyse de la surface spécifique)
BTP : Batiment et travaux public
CA : Conseil d'Administration (ou Conductivité Électrique Apparente, selon le contexte)*
CAG : Centre d'Analyse et de Contrôle de la Qualité
CAP : Corrective Action Plan (Plan d'action corrective)
CDMO : Contract Development and Manufacturing Organization (Organisation de développement et de fabrication sous contrat)
CE : Communauté européenne
CED : Catalogue Européen des Déchets
CMO : Contract Manufacturing Organization (Organisation de fabrication sous contrat)
CRO : Contract Research Organization (Organisation de recherche sous contrat)
DAE : Déchets d'Activités Économiques
DD : Déchets Dangereux
DI : Déchets Inertes
DND : Déchets Non Dangereux
DS : Déchets Spéciaux
DSD : Déchets Spéciaux Dangereux
DRX : Diffraction des Rayons X
DSM : Dutch State Mines
EEC : European Economic Community
EMA : European Medicines Agency (Agence européenne des médicaments)
FCA : Fédération Cosmétiques Algérie
FEBEA : Fédération des Entreprises de la Beauté
FDA : Food and Drug Administration (Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux)
FTIR : Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier)
IA : Intelligence Artificielle
MEB : Microscopie Électronique à Balayage
OM : Ordures Ménagères
PCPC : Personal Care Products Council (Conseil des produits de soins personnels)
PE : Polyéthylène
PNAE-DD : Plan National d'Action pour l'Environnement et le Développement Durable
PS : Polystyrène
PVC : Polychlorure de vinyle
QA : Quality Assurance (Assurance qualité)
QC : Quality Control (Contrôle qualité)
SEM : Scanning Electron Microscopy (Microscopie Électronique à Balayage — en anglais)
TAPD : Taxe sur les Activités Polluantes et Dangereuses
TEOM : Taxe d'Enlèvement des Ordures Ménagères

Liste des figures

Figure 1 : Cycle de vie des déchets.	11
Figure 2: Mise au point d'un médicament dans l'industrie pharmaceutique.	27
Figure 3: Charbon actif en poudre.	30
Figure 4: Charbon actif granulé.	31
Figure 5: les Groupements de surface du CA.	33
Figure 6: Marc de café.	40
Figure 7: Grain de marc de café commercial par microscopie électronique à balayage.....	41
Figure 8: Noyaux de dattes.	43
Figure 9: Appareil MEB.....	45
Figure 10: Schéma du principe du MEB.....	46
Figure 11: Spectromètre et microscope FTIR Agilent Cary série 680.....	46
Figure 12: modes vibrationnels infrarouge d'une liaison CH.	47
Figure 13 : Appareil d'analyse DRX.	48
Figure 14: Appareil d'analyse BET.	49
Figure 15: Présentation schématique d'un dispositif d'analyse thermogravimétrique.	50
Figure 16: Analyse MEB du marc du café avant pyrolysé.....	53
Figure 17: Analyse MEB du marc du café pyrolysé	56
Figure 18: Analyse MEB du marc du café pyrolysé et activé	57
Figure 19: Analyse MEB du marc du café après deuxième pyrolyse	59
Figure 20 : Analyse FTIR du charbon actif durant les 4 étapes.	60
Figure 21: ATG du charbon actif durant les 4 étapes	61
Figure 22: Analyse MEB des noyaux des dattes avant pyrolyse..	65
Figure 23: Analyse MEB des noyaux des dattes après activation chimique.....	66
Figure 24: Analyse MEB des noyaux des dattes après deuxième pyrolyse.	67
Figure 25: Analyse FTIR du charbon actif durant les 4 étapes.	69
Figure 26: ATG du charbon actif durant les 4 étapes.....	72

Liste des tableaux

Tableau I.1	: La liste des chapitres.....	9
Tableau I.2	: Exemple d'un sous-chapitre.....	11
Tableau II.3	: les avantages et les inconvénients du charbon actif en poudre.....	32
Tableau II.4	: les Avantages et les Inconvénients du charbon actif en granulé.....	33
Tableau II.5	: Classification de porosité.....	34
Tableau III.6	: Composition élémentaire du marc de café.....	43
Tableau III.7	: Les principaux composés du marc de café.....	43
Tableau III.8	: produits et matériels utilisés.....	45
Tableau III.9	: produits et matériels utilisés.....	47
Tableau IV.10	: Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif 1.....	57
Tableau IV.11	: Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif 2.....	58
Tableau IV.12	: Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif 3.....	58
Tableau IV.13	: Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif 4.....	59
Tableau IV.14	: Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif 5.....	61
Tableau IV.15	: Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif 6.....	62
Tableau IV.16	: Résumé de l'évolution structurale.....	65
Tableau IV.17	: Comparaison entre les échantillons.....	67
Tableau IV.18	: Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif.....	69
Tableau IV.19	: Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif.....	70
Tableau IV.20	: Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif.....	71
Tableau IV.21	: Tableau récapitulatif de l'évolution structurale du charbon actif.....	73
Tableau IV.22	: Comparaison et synthèse.....	75
Tableau IV.23	: Synthèse des performances.....	76

Table des matières

Introduction générale.....	1
I. Chapitre I : Généralité sur les déchets	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition des déchets :.....	3
I.2.1. Selon le dictionnaire Larousse le déchet est un :	3
I.2.2. Selon la réglementation Algérienne :	3
I.2.3. Selon la réglementation européenne :	3
I.2.4. D'un point de vue économique :	4
I.2.5. D'un point de vue juridique :	4
I.2.6. Définition sociologique de "déchet" :	4
I.3. Origine de la production des déchets :	4
I.4. Acteurs :	5
I.5. Caractéristiques des déchets :	6
I.6. Typologie des déchets :.....	6
I.6.1. Selon l'état physique :.....	6
I.6.2. Selon la nature chimique :.....	6
I.6.3. Selon la dangerosité :	7
I.6.4. Selon le mode de traitement des déchets :	7
I.6.5. Selon la réglementation algérienne :	8
I.6.5.1. Les déchets spéciaux / les déchets spéciaux dangereux :	8
I.6.5.2. Les déchets ménagers et assimilés (DMA) :	8
I.6.5.3. Les déchets inertes (DI) :	8
I.6.6. Selon la réglementation européenne :	8
I.7. Cycle de vie des déchets :	12
I.8. La gestion des déchets	12
I.8.1. Pré-collecte des déchets	12
I.8.2. Collecte des déchets :	13
I.8.2. Transport :	13
I.8.3. Tri des déchets :	13
I.8.4. Valorisation des déchets.....	13
I.8.4.1. Valorisation matérielle	13
I.8.4.2. Valorisation énergétique	14
I.8.5. Le traitement des déchets.....	14
I.9. Évolution du Cadre Législatif Algérien en Matière de Gestion des Déchets : De la Loi 01-19 à la Loi 25-02	14
I.9.1. Cadre institutionnel :	14

I.9.2. Cadre réglementaire :	15
I.9.3. Loi n° 01-19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets :	15
I.9.4. La loi n° 25-02 du 21 Chaâbane 1446 correspondant au 20 février 2025 modifie et complète la loi n° 01-19 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets :	16
I.10. Impact des déchets :	17
I.10. Impact sur l'environnement :	17
I.10.2. Impact sur la santé :	18
I.11. Conclusion	18
Références bibliographiques :	18
II. Chapitre I : l'industrie pharmaceutique, parapharmaceutique et cosmétique.....	23
II.1. Introduction	23
II.2. Industrie cosmétique :	23
II.2.1. Définition :	23
II.2.2. Un produit cosmétique :	23
II.2.3. Les différents types d'acteurs de l'industrie cosmétique :	24
II.2.3.1. Fabricants de produits cosmétiques :	24
II.2.3.2. Fournisseurs d'ingrédients et de matières premières :	24
II.2.3.3. Prestataires de services de fabrication (CMO) :	24
II.2.3.4. Fabricants d'équipements et d'emballages :	25
II.2.3.5. Organismes de régulation et associations professionnelles :	25
II.2.4. Les challenges de l'industrie cosmétique pour 2030 et au-delà :	25
II.3. L'industrie pharmaceutique :	25
II.3.1. Définition :	25
II.3.2. Les différents types d'acteurs de l'industrie pharmaceutique :	26
II.3.2.1. Entreprises pharmaceutiques :	27
II.3.2.2. BioTech : entreprises de biotechnologies :	27
II.3.2.3. Organismes de recherche académique :	27
II.3.2.4. Sous-traitants en fabrication (CDMO) :	27
II.3.2.5. Prestataires de services contractuels (CRO) :	27
II.3.2.6. Organismes de réglementation :	27
II.3.2.7. Distributeurs et grossistes :	27
II.3.4. Les challenges de l'industrie pharmaceutique pour 2030 :	27
II.4. L'industrie parapharmaceutique :	29
II.4.1. Définition :	29
II.4.2. Produits parapharmaceutiques :	29
II.4.3. Différence entre produit pharmaceutique et parapharmaceutique :	30
II.4.4. Catégories :	30

II.5. Les produits communs :.....	30
II.5.1. La Cellulose – Excipient et structurant naturel	30
II.5.2. Le Charbon actif – Actif purifiant naturel	30
II.5.3. L’Alcool (éthanol) – Solvant et antiseptique	30
II.6. Charbon actif :	31
II.6.1. Définition :.....	31
II.6.2. Les différentes formes du charbon actif :	31
II.6.2.1. Charbon actif en poudre (CAP) :	31
II.6.2.2. Charbon actif granulé (CAG) :	32
II.6.2.3. Les fibres de charbon activé :	33
II.6.3. Les propriétés charbon actifs :	33
II.6.3.1. Propriétés physiques :.....	33
II.6.3.2. Propriétés chimiques :.....	34
II.6.4. Domaines d’utilisation :	34
II.6.5. Classification des charbons actifs :.....	35
II.6.6. La préparation du charbon actif :.....	35
II.6.6.1. La pyrolyse :	35
II.6.6.2. L’activation :.....	35
II.7. Substrats :	36
II.8. Élimination ou réactivation ?.....	36
II.9. Conclusion	36
Références bibliographiques :	37
III. Matériels et méthodes.....	41
III.1. Introduction	41
III.2. Choix de la biomasse :	41
III.2.1. Le marc du café :.....	41
III.2.1.1. Définition :.....	41
III.2.1.2. Propriétés du marc du café :	41
III.2.1.4. Protocole de préparation du charbon actif à partir du marc de café :.....	42
III.3. Les noyaux des dattes :.....	44
III.3.1. Définition :	44
III.3.2. Composition chimique générale :.....	44
III.3.3. Propriétés nutritives et fonctionnelles :.....	44
III.3.4. Utilisations potentielles :.....	45
III.3.5. Protocole de préparation du charbon actif à partir des noyaux de datte :	45
III.4. Méthodes de caractérisation du charbons actifs préparé :.....	46
III.4.1. Analyse par MEB :	46

III.4.1.1. Principe	47
III.4.2. Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) :	47
III.4.2.1. Appareillage	47
III.4.2.2. L'objectif :	48
III.4.2.3. Principe :	48
III.4.3. Analyse par diffraction des rayons X (DRX) :	48
III.4.3.1. Principe :	49
III.4.3.2. Objectif :	49
III.4.4. Analyse par Brunauer–Emmett–Teller (BET) :	50
III.4.4.1. Principe :	50
III.4.4.2. Objectifs :	50
III.4.4.3. Caractéristiques :	50
IV.4. L'analyse thermogravimétrique (ATG)	50
IV.4.1. Dispositif expérimental	50
IV.4.2. Résultats	51
IV.4.3. Applications	51
III.5. Conclusion	51
Références bibliographiques :	52
IV. Résultats et discussion	54
IV.1. Introduction	54
IV.2. Résultats de la caractérisation du charbon actif extrait du marc de café :	54
IV.2.1. Analyse MEB du charbon actif :	54
IV.2.2. Analyse FTIR :	61
IV.2.2.1. Évolution des groupements fonctionnels : comparaison des spectres FTIR	63
IV.2.3. L'analyse thermogravimétrique (ATG)	64
IV.3. Résultats de la caractérisation du charbon actif extrait des noyaux de dattes :	66
IV.3.1. Analyse MEB	66
IV.3.2. Analyse FTIR	69
IV.3.3. L'analyse thermogravimétrique (ATG)	72
IV.4. Comparaison entre le charbon actif extrait du marc de café et celui des noyaux de dattes	75
IV.4.1. Morphologie et structure poreuse (analyse MEB)	75
IV.4.2. Groupements fonctionnels (analyse FTIR)	75
IV.4.3. Stabilité thermique (analyse ATG)	76
IV.4.4. Propriétés texturales (analyse BET)	76
IV.5. Conclusion	77
Conclusion Générale	80

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La gestion durable des déchets et la valorisation des ressources renouvelables constituent aujourd'hui un pilier fondamental du développement durable. Face à l'accroissement continu des volumes de déchets organiques, notamment issus des activités domestiques et agroalimentaires, de nouvelles stratégies émergent pour transformer ces sous-produits en matériaux à haute valeur ajoutée. L'économie circulaire, qui vise à limiter le gaspillage des ressources et à réintégrer les déchets dans les cycles de production, représente dans ce cadre un levier stratégique pour les pays en développement comme l'Algérie.

Dans ce contexte, une question fondamentale se pose : peut-on valoriser efficacement des déchets organiques locaux, tels que le marc de café et les noyaux de dattes, afin de produire un charbon actif aux performances comparables à celles des charbons commerciaux ?

Parmi les biomasses largement disponibles mais peu exploitées figurent le marc de café et les noyaux de dattes. Ces deux sous-produits sont générés en grandes quantités dans la vie quotidienne et l'industrie agroalimentaire, et présentent une teneur élevée en carbone ainsi qu'une structure lignocellulosique favorable à la transformation en charbon actif. Ce dernier est un matériau poreux, connu pour sa grande capacité d'adsorption, et utilisé dans de nombreuses applications : purification de l'eau, traitement des gaz, industrie cosmétique, pharmaceutique, etc.

L'objectif principal de ce travail est donc d'étudier la valorisation conjointe du marc de café et des noyaux de dattes pour la préparation de charbon actif, à travers un procédé combinant pyrolyse, activation et post-traitements thermiques, en vue d'obtenir un matériau aux performances comparables à celles des charbons commerciaux.

Pour évaluer les propriétés du charbon actif obtenu, un ensemble de techniques de caractérisation physico-chimique ont été mises en œuvre :

- **FTIR** (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier) : pour identifier les groupes fonctionnels présents à la surface du charbon.
- **ATG** (analyse thermogravimétrique) : pour étudier la stabilité thermique et les pertes de masse.
- **MEB** (microscopie électronique à balayage) : pour visualiser la morphologie et la texture de surface du matériau.
- **DRX** (diffraction des rayons X) : pour déterminer la cristallinité et la structure du matériau carboné.
- **BET** (Brunauer–Emmett–Teller) : pour mesurer la surface spécifique et la porosité, deux paramètres essentiels dans les performances d'adsorption.

Ce mémoire s'articule autour de quatre grandes parties. Dans un premier temps, une revue générale sur la problématique des déchets, leur gestion et leur valorisation est proposée. Ensuite, nous présentons les caractéristiques des industries cosmétiques, pharmaceutiques et parapharmaceutiques qui utilisent le charbon actif. Le chapitre expérimental expose les protocoles de préparation des charbons et les méthodes analytiques utilisées. Enfin, les résultats issus des différentes analyses sont discutés afin d'évaluer la qualité du charbon obtenu et sa pertinence dans des applications potentielles.

Par cette recherche, nous espérons démontrer que des déchets organiques simples, abondants et gratuits comme le marc de café et les noyaux de dattes peuvent être transformés en un matériau fonctionnel performant, contribuant ainsi à la protection de l'environnement et à l'innovation dans le domaine des matériaux durables.

CHAPITRE 1 :

Généralité sur les déchets

I. Chapitre I : Généralité sur les déchets

I.1. Introduction

À travers ce chapitre, nous établissons une base théorique essentielle sur la notion de déchet, en abordant ses définitions, ses classifications selon l'origine, la nature, la dangerosité, le mode de traitement, ainsi que les approches européenne et algérienne. Nous avons également examiné les principes de gestion des déchets à travers le cadre législatif national, notamment les lois 01-19 et 02-25, qui encadrent les opérations de collecte, traitement et élimination. Enfin, l'analyse des impacts environnementaux et sanitaires souligne l'importance d'une gestion responsable et durable. Cette synthèse théorique constituera un appui fondamental pour l'étude des pratiques actuelles et l'évaluation des enjeux dans les chapitres à venir.

I.2. Définition des déchets :

I.2.1. Selon le dictionnaire Larousse le déchet est un :

- Débris, restes d'aliments qui sont impropres à la consommation ou à l'usage : Jeter les déchets à la poubelle. ¹
- Matériaux rejetés comme n'ayant pas une valeur immédiate ou laissés comme résidus d'un processus ou d'une opération. (On nomme déchets industriels ceux qui ne peuvent ni être admis en décharge ni être ramassés avec les ordures ménagères en raison de leur quantité ou de leur toxicité). ¹
- Produits incombustibles et inutiles du métabolisme des cellules vivantes, destinés soit à être rejetés (gaz carbonique, excréta, urine, sueur, urée, acide urique), soit, chez les végétaux surtout, à être accumulés à l'écart de la circulation générale (latex, oléorésines, alcaloïdes, etc.). ¹

I.2.2. Selon la réglementation Algérienne :

D'après l'article 03 de la loi 01-19 du 12 décembre 2001 : Le déchet est :

« Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout objet, bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer. » ²

I.2.3. Selon la réglementation européenne :

Un « déchet » est défini réglementairement comme « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou

l'obligation de se défaire ». La réglementation sur les déchets a pour socle la Directive n° 2008/98/CE du 19/11/2008 modifiée, dite Directive Cadre Déchets, transposée dans le Code de l'Environnement en droit français.³

« Est considéré comme déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon. » D'après la loi n°75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets, modifiée par la loi n°92-646 du 13 juillet 1992.⁴

I.2.4. D'un point de vue économique :

« La valeur constitue le fondement de l'économie ».

Du point de vue économique, un déchet sera défini comme Tout résidu d'un processus de production, de transformation Ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble qui ne présente plus d'utilité ni de valeur d'échange pour son détenteur.

Les référents sont d'une part la valeur d'usage ou utilité, D'autre part la valeur d'échange ou valeur marchande. Les Deux caractéristiques absence d'utilité (utilité nulle ou négative) pour le détenteur et absence de valeur d'échange (valeur d'échange nulle ou négative) pour le détenteur doivent être réunies pour qu'il s'agisse d'un déchet.⁵

I.2.5. D'un point de vue juridique :

Les termes de « bien meuble » et « abandon » font appel à des notions de droit civil appartenant à la terminologie du droit des biens.

Le terme « abandon » pourrait rattacher juridiquement le déchet « bien meuble » à la catégorie des « choses sans maîtres », choses volontairement délaissées par leur propriétaire.

Cependant, la notion de détenteur et la définition de l'abandon renvoient implicitement à la responsabilité du producteur et/ou du détenteur de déchets.

Aussi, derrière tout déchet surtout générateur de nuisances, se trouve une personne physique qui le produit ou le détient et qui en est responsable jusqu'à son élimination finale. Et ce même si le déchet n'est plus physiquement entre ses mains.⁶

I.2.6. Définition sociologique de "déchet" :

Les déchets est le témoin de la culture et de ses valeurs. Il est le révélateur du niveau social des populations et de l'espace dans lequel elles évoluent (zones rurales ou urbaines, habitat collectif ou individuel). Il est aussi le reflet d'une dépréciation économique ou sociologique à un moment donné.⁴

I.3. Origine de la production des déchets :

La production des déchets est évidente pour les raisons suivantes :

- **Biologique :** Les déchets d'origine biologique sont définis par le fait que tout cycle de vie produit des métabolites (matière fécale, cadavre...).
- **Chimique :** Toute réaction chimique est régie par les principes de la conservation de la matière et dès lors si l'on veut obtenir un produit C à partir des produits A et B par la réaction $A + B \rightarrow C + D$; D sera un sous-produit qui est un déchet.

- **Technologique** : Les outils et procédés de production, sont accompagnés inévitablement des rejets, tels que chutes, solvants usés, emballage, etc.
- **Économique** : La durabilité des produits, des objets et des machines a forcément une limite qui les conduit, un jour ou l'autre à leur élimination ou leur remplacement.
- **Écologique** : Les activités de dépollution (eau, air, déchets) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront eux aussi une gestion spécifique, ... et ainsi de suite.
- **Accidentelle** : Les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et les panes irréparables sont à l'origine des déchets. ⁷

I.4. Acteurs :

La gestion des déchets repose sur une collaboration complexe entre plusieurs acteurs qui interviennent à différents niveaux pour garantir le bon déroulement des processus de collecte, de tri et de valorisation des déchets. Ces acteurs incluent les collectivités territoriales, les producteurs, les transporteurs, les courtiers, les marchands, les gestionnaires et l'état et Les associations environnementales :

- **Les collectivités territoriales (la commune, la wilaya)** : Les collectivités territoriales jouent un rôle central dans la gestion des déchets ménagers. Elles sont responsables de l'organisation de la collecte des déchets, du tri et de leur traitement. Ce sont elles qui gèrent les déchetteries, les centres de tri, ainsi que les infrastructures de valorisation énergétique et de recyclage.
- **Producteurs des déchets** :
 - Les entreprises, particulièrement dans les secteurs industriels et du BTP, sont les premiers producteurs de déchets non dangereux et dangereux. Elles sont légalement tenues de traiter et de valoriser leurs déchets, souvent en s'appuyant sur des filières privées spécialisées. Certaines grandes entreprises industrielles disposent de leurs propres systèmes de traitement ou collaborent avec des opérateurs pour la valorisation matière et énergétique des déchets produits.
 - Société civile et membre du quartier : citoyens, établissements scolaires, ...).
- **Transporteur de déchets** : Les transporteurs de déchets sont des entreprises qui transportent des déchets pour le compte de tiers, ainsi que des entreprises qui transportent des déchets dans le cadre de leurs propres activités.
- **Courtier en déchets** : est la personne physique ou morale désignée par le producteur de déchets pour organiser les opérations de valorisation des déchets ou d'élimination. Comme le courtier en déchets se concentre exclusivement sur l'organisation des opérations, il n'a ni la propriété ni la possession des déchets, de sorte que la responsabilité des déchets incombe au producteur de déchets, qui a le dernier mot.
- **Marchand de déchets** : un négociant en déchets est une personne qui achète et vend des déchets en vue de leur traitement, sans avoir à prendre physiquement possession des déchets, et ne doit donc pas disposer d'une installation de traitement des déchets.
- **Gestionnaire de déchets** : un gestionnaire de déchets est une personne ou une entité qui a été enregistrée et autorisée à effectuer les opérations liées à la gestion des déchets.
- **L'état et Les associations environnementales** : (ministère de l'environnements, Agence national des déchets....) : jouent un rôle de veille et de sensibilisation. Elles informent les citoyens sur l'importance du tri sélectif, du réemploi et des bonnes pratiques pour une réduction des déchets. Elles participent également à des actions contre les décharges illégales et les pollutions liées aux déchets et fixent les lois.

I.5. Caractéristiques des déchets :

Selon (NIGNIKAM, 1992 in SOTAMENOU, 2005), on caractérise les déchets par quatre paramètres essentiels : la densité, le degré d'humidité, le pouvoir calorifique, le rapport des teneurs en carbone et azote (C/N).

➤ La densité :

La connaissance de la densité est d'une grande importance pour le choix des moyens de collecte et de stockage. Toutefois comme les déchets sont compressibles, la densité n'a un sens que si on définit les conditions dans lesquelles on la détermine. C'est pourquoi on peut avoir une densité en poubelle, une densité en benne, une densité en décharge, une densité en fosse, etc. La densité en poubelle est mesurée en remplissant les ordures fraîches dans un récipient de capacité connue sans tassement.

➤ Le degré d'humidité :

Les ordures renferment une suffisante quantité d'eau variant en fonction des saisons et le milieu environnemental. Cette eau a une grande influence sur la rapidité de la décomposition des matières qu'elles renferment et sur le pouvoir calorifique des déchets.

➤ Le pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique est défini comme la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de poids en ordures brutes. Il s'exprime en millithermie par kilogramme d'ordures (mth/Kg).

➤ Le rapport des teneurs en carbone et azote :

Le rapport C/N a été choisi comme critère de qualité des produits obtenus par le compostage des déchets. Il est d'une grande importance pour le traitement biologique des déchets, car l'évolution des déchets en fermentation peut être suivie par la détermination régulière de ce rapport.⁸

I.6. Typologie des déchets :

I.6.1. Selon l'état physique :

- **Déchets solides** : ordures ménagères (OM), déchets de métaux, déchets inertes (gravats, laitiers, scories, cendres...), déchets combustibles/non combustibles, déchets de caoutchouc et plastiques, déchets de bois, paille, ...etc.)
 - **Boues** : exemple boue de station d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles, boues d'origines diverses (provenant de traitement de surfaces, peinture d'hydrocarbures...etc.)
 - **Déchets liquides ou pâteux** : comme les goudrons, huiles usagées, solutions résiduelles diverses,etc.).
 - **Déchets gazeux** : huiles usagées, solutions résiduelles diverses,
- ✓ INCONVENIENTS DE CETTE CLASSIFICATION EST LES POSSIBILITES DE CHANGEMENT D'ETAT PHYSIQUE AU COURS DU TEMPS (DECHETS EVOLUTIFS) ET L'EXISTENCE DE DECHETS POLYPHASIQUE (MELANGE DE SOLIDE, D'EMULSION ET D'UNE PHASE LIQUIDE OU PATEUSE).⁸

I.6.2. Selon la nature chimique :

- **Déchets acides** : solutions résiduelles acides diverses (HCL H₂SO₄, HNO₃,, acides organiques), acides à l'état de gaz,
- **Déchets basiques** : soude et potasse résiduelles, liqueurs ammoniacales, chaux résiduelle (boue de carbure),
- **Sels résiduelles** : sulfates de calcium, carbonate de calcium sulfate ferreux,.....

- **Métaux** : ferrailles, carcasse de véhicules, déchets de métaux précieux, câbles,
 - **Déchets organiques** : solvants usés, huiles usagées, boues d'hydrocarbures, liqueurs résiduelles, phénols,
 - **Déchets polymériques** : déchets de caoutchouc et de plastiques (PVC ,PS ,PE ,polyuréthane,...)
 - **Déchets minéraux** : déchets siliceux (sable de fonderies), déchets de silicates ou silico-aluminates (schistes houillers, déchets de verre, cendres de centrale thermiques,...) déchets de calcaire (déchets de marbre, carbonate de calcium résiduaire de sucreries,...)
- ✓ **L'INCONVENIENT DE CETTE CLASSIFICATION EST L'EXISTENCE DE DECHETS DE NATURE CHIMIQUE COMPLEXE (MELANGE).**⁸

I.6.3. Selon la dangerosité :

- **Les déchets dangereux** : Les déchets sont considérés comme dangereux s'ils présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes : Explosif, inflammable, irritant, nocif, toxique, cancérigène, corrosif, infectieux, toxique pour la reproduction, mutagène, écotoxique pour la santé humaine et l'environnement.
- **Les déchets non dangereux** : sont les déchets qui ne présentent aucune des caractéristiques relatives des déchets dangereux (toxique, explosif, corrosif, ...). Ce sont des déchets banals (habituels) des entreprises, commerçants, et artisans (papiers, cartons, bois, textiles, ...) et les déchets ménagers.
- **Les déchets inertes** : Sont des solides minéraux qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique avec l'environnement.
- Ils ne sont pas biodégradables et ne se décomposent pas au contact d'autres matières. Ex. Les déchets de graviers, les débris de pierres, les déchets de sable ou encore d'argiles, Pavés, gravats, carrelage. Ils proviennent des chantiers du bâtiment et travaux publics, mais aussi des mines et des carrières.
- **Les déchets toxiques en petites quantités** : Ce sont des déchets dangereux produits en petites quantités par les ménages, les commerçants (Garage, coiffeurs, laboratoires de photos, imprimeries, laboratoires de recherches...). Il peut s'agir de déchets banals souillés (chiffons, cartons,...), piles, résidus de peinture, médicaments périmés... etc.
- **Les déchets ultimes** : Un déchet ultime, à caractère polluant ou dangereux et nécessite un traitement spécial.
- **Déchets radioactifs.**⁷

I.6.4. Selon le mode de traitement des déchets :

- **Les déchets biodégradables ou décomposables** : Comme les résidus verts, boues d'épuration des eaux, restes alimentaires...,
- **Les déchets recyclables** : Comme le verre, métaux, matières plastiques. Ces déchets peuvent être réutilisés directement dans d'autres domaines ou recyclés.
- **Les déchets spéciaux et déchets industriels spéciaux** : Dont font partie les déchets toxiques, les déchets radioactifs et déchets nucléaires qui doivent faire l'objet d'un traitement tout à fait particulier en raison de leur nocivité particulière liée à la radioactivité.⁷

I.6.5. Selon la réglementation algérienne :

Les déchets sont classifiés en trois catégories (Article 05 de la loi n° 01-19 du 12/12/2001) :

I.6.5.1. Les déchets spéciaux / les déchets spéciaux dangereux :

- **Les déchets spéciaux dangereux (DSD) :** tous Déchets spéciaux qui, par leurs Constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent, Sont susceptibles de nuire à la santé Publique et/ou à l'environnement.
- **Les déchets spéciaux (DS) :** tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui, en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent, ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés et les déchets inertes.

I.6.5.2. Les déchets ménagers et assimilés (DMA) :

Tous déchets issus des ménages ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, commerciales, artisanales et autres qui, par leur nature et leur composition, sont assimilables aux déchets ménagers.

I.6.5.3. Les déchets inertes (DI) :

Tous déchets Provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de Démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres Eléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et/ou à l'environnement.⁹

I.6.6. Selon la réglementation européenne :

Le classement des déchets, qui permet de distinguer les règles applicables, peut se faire selon différents critères (articles R.541-7 et R541-8 du code de l'environnement) :

➤ **Classification selon le producteur du déchet :**

On distingue les « DECHETS MENAGERS » (relevant de la responsabilité des collectivités territoriales dans le cadre du service public de gestion des déchets) et LES « DECHETS D'ACTIVITES ECONOMIQUES » (DAE) (relevant de la responsabilité du producteur initial). On parle également de « DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES » (DMA) lorsque les collectivités prennent en charge certains déchets de professionnels.¹⁰

➤ **Classification selon les propriétés du déchet :**

On distingue « LES DECHETS DANGEREUX » (DD) qui présentent une ou plusieurs des 15 propriétés de danger définies au niveau européen (annexe III de la directive 2008/98/ CE du parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative au déchet) et « LES DECHETS NON DANGEREUX » (DND) qui ne présentent aucune de ces 15 propriétés de danger. Parmi les déchets non dangereux, on peut encore distinguer :

- **Les déchets inertes :**

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante (ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine).

- **Les biodéchets :**

Déchet biodégradable de jardin ou de parc, déchet alimentaire ou de cuisine, déchet comparable provenant des établissements de production ou de transformation de denrées alimentaires.¹⁰

➤ **Classification selon le secteur de production :**

Les déchets sont répertoriés dans une nomenclature (liste unique des déchets qui figure à l'annexe de la décision 2000/532/CE de la Commission du 3 mai 2000) qui permet de les identifier par un code à six chiffres faisant référence à leur secteur de production. Le code du déchet, issu de cette nomenclature, est nécessaire dans les documents de gestion de ce déchet, le code dit CED (Catalogue européen des déchets). ¹⁰ voir annexe N 1

Ces six chiffres ont la signification suivante :

- Les deux premiers chiffres correspondent à la catégorie d'origine.
- Les deux chiffres suivants indiquent le secteur d'activité, le processus ou les opérateurs d'où il provient.
- Les deux derniers chiffres identifient le déchet. Dans le cas des codes de traitement des déchets, la division se fait de la manière suivante :
- 20 chapitres faisant référence à la source qui les génère ou au type de déchets (codes à 2 chiffres).
- Sous - chapitres se référant aux processus de production, aux matériaux résultants ou au type de déchets (codes à 4 chiffres). ¹¹

Exemple :

- **20 01 01** : papier et carton.
- **01 03 07*** : autres déchets contenant des substances dangereuses provenant de la transformation physique et chimique des minéraux métallifères.

L'astérisque (*) : signifie que le déchet est considéré comme dangereux.

Tableau I.1 : La liste des chapitres. ¹²

N°	Description des déchets
01	Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux
02	Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments
03	Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton
04	Déchets provenant des industries du cuir, de la fourrure et du textile

05	Déchets provenant du raffinage du pétrole, de la purification du gaz naturel et du traitement pyrolytique du charbon
06	Déchets des procédés de la chimie minérale
07	Déchets des procédés de la chimie organique
08	Déchets provenant de la fabrication, de la formulation, de la distribution et de l'utilisation (FFDU) de produits de revêtement (peintures, vernis et émaux vitrifiés), mastics et encres d'impression
09	Déchets provenant de l'industrie photographique
10	Déchets provenant de procédés thermiques
11	Déchets provenant du traitement chimique de surface et du revêtement des métaux et autres matériaux, et de l'hydrométallurgie des métaux non ferreux
12	Déchets provenant de la mise en forme et du traitement physique et mécanique de surface des métaux et matières plastiques
13	Huiles et combustibles liquides usagés (sauf huiles alimentaires et huiles figurant aux chapitres 05 et 12)
14	Déchets de solvants organiques, agents réfrigérants et propulseurs (sauf chapitres 07 et 08)
15	Emballages et déchets d'emballages; absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants et

	vêtements de protection non spécifiés ailleurs
16	Déchets non décrits ailleurs sur la liste
17	Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)
18	Déchets provenant des soins médicaux ou vétérinaires et/ou de la recherche associée (sauf déchets de cuisine et de restauration ne provenant pas directement des soins médicaux)
19	Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel
20	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations), y compris les fractions collectées séparément

Tableau I.2 : Exemple d'un sous-chapitre. ¹²

Code	Description des déchets
20 02 01	déchets biodégradables
20 02 02	terres et pierres
20 02 03	autres déchets non biodégradables
20 03	autres déchets municipaux
20 03 01	déchets municipaux en mélange
20 03 02	déchets de marchés
20 03 03	déchets de nettoyage des rues
20 03 04	boues de fosses septiques
20 03 06	déchets provenant du nettoyage des égouts
20 03 07	déchets encombrants

20 03 99

déchets municipaux non spécifiés ailleurs

I.7. Cycle de vie des déchets :

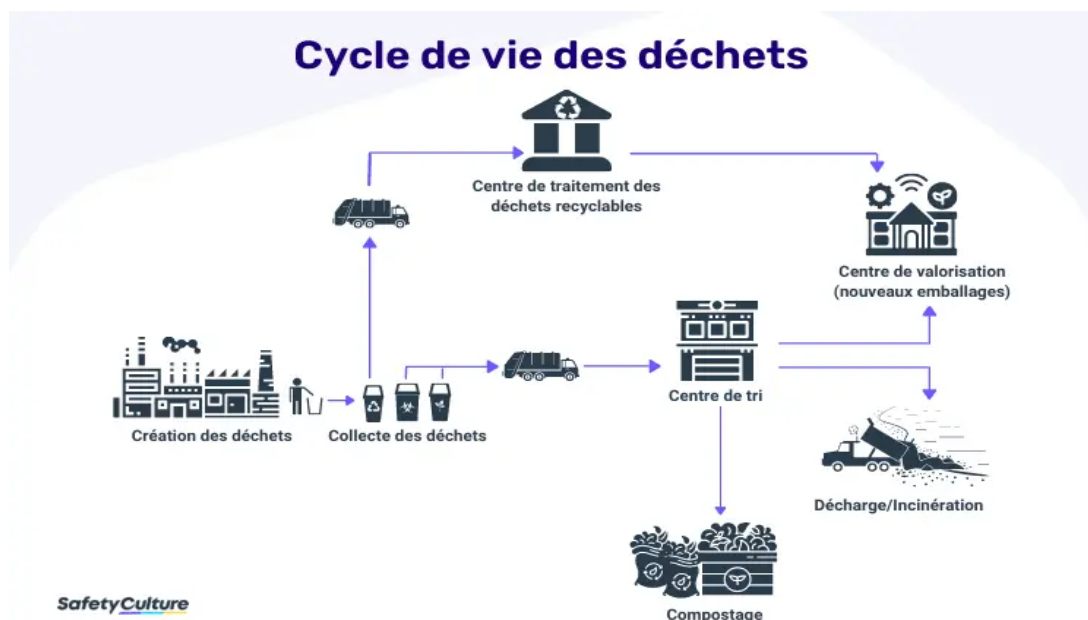


Figure 1 : Cycle de vie des déchets.

La figure ci-dessus illustre le cycle de vie des déchets, depuis leur génération jusqu'à leur traitement final. Ce processus comprend plusieurs étapes essentielles : la création des déchets, leur collecte, puis leur acheminement vers un centre de tri. À ce stade, les déchets sont séparés selon leur nature et leur potentiel de valorisation. Les déchets organiques peuvent être dirigés vers une unité de compostage, tandis que les matériaux recyclables sont envoyés vers un centre de traitement approprié. Certains déchets peuvent également être valorisés pour la production de nouveaux emballages. Enfin, les résidus non valorisables sont destinés à l'élimination par décharge ou incinération.

I.8. La gestion des déchets

Le terme « gestion des déchets » englobe, de manière générale, toute activité participant à l'organisation de la prise en charge des déchets depuis leur production jusqu'à leur traitement final. Elle inclut notamment les activités de collecte, transport, négoce, courtage, et traitement, valorisation ou élimination des déchets.¹³

Elle consiste à :

I.8.1. Pré-collecte des déchets

Représente une phase essentielle dans la chaîne de gestion des déchets solides. Elle correspond aux opérations intermédiaires effectuées entre la production des déchets et leur collecte officielle par les services municipaux ou privés. Cette étape inclut le tri à la source, le stockage temporaire dans des récipients adaptés, ainsi que le transport vers des points de regroupement.

I.8.2. Collecte des déchets :

Le ramassage et/ou le regroupement des déchets en vue de leur transfert vers un lieu de traitement.²

Les modes de collecte des déchets :

➤ **Collecte en porte à porte :**

Le citoyen dépose les déchets préalablement triés dans des récipients qui lui sont propres ou communs avec les voisins. La collecte se fait par ramassage avec le véhicule circulant à proximité des habitations. Comme ce mode de collecte demande beaucoup de personnel et des véhicules normalisés, il est utilisé dans les villes ou communes importantes. La porte à porte est utilisée depuis longtemps, à l'origine il était pour les vieux cartons et papiers. Actuellement, il se généralise pour les emballages métalliques, les plastiques, les cartons.

➤ **Collecte en apport volontaire :**

La collecte en apport volontaire (appelé aussi points de regroupement) est utilisée dans les zones où il y a une faible densité de population, la distance à parcourir entre les maisons est trop importante pour pouvoir organiser une collecte porte à porte, des points de regroupement comportant des récipients (conteneurs) de collecte spécifique et de capacité appropriés sont installés aux points fréquentés par les habitants. Ce mode de collecte nécessite un effort supplémentaire du citoyen, puisque celui-ci doit trier au préalable ses déchets et les porter ensuite au point de regroupement.

• **La collecte sélective :**

Soit en apport volontaire ou porte à porte concerne principalement les déchets valorisables (recyclage, réutilisation) des déchets ménagers.¹⁴

I.8.2. Transport :

Le transport est la phase au cours de laquelle les ordures sont acheminées vers une destination appropriée : décharge, Centre d'enfouissement technique (CET), usine de traitement, etc. Les différents types de collecte de déchets urbains font intervenir des modes de transport allant des plus rudimentaires (charrettes) aux plus sophistiqués, comme les camions-bennes.¹⁵

I.8.3. Tri des déchets :

Toutes les opérations de séparation des déchets selon leur nature en vue de leur valorisation ou leur traitement.²

I.8.4. Valorisation des déchets

I.8.4.1. Valorisation matérielle

La valorisation matérielle consiste à introduire des matières résiduelles dans un nouveau cycle de production, sans les transformer en énergie. Elle comprend plusieurs sous-catégories.

I.8.4.1.1. Valorisation organique

Elle concerne les déchets biodégradables (déchets verts, alimentaires, boues...). Deux techniques principales :

- **Compostage** : processus biologique de dégradation aérobie produisant du compost, utilisé comme amendement organique pour les sols.
- **Méthanisation** : fermentation anaérobie des matières organiques produisant du biogaz (principalement du méthane), utilisé comme source d'énergie, et du digestat valorisable comme fertilisant.

I.8.4.1.2. Valorisation inorganique

Elle s'applique aux déchets non biodégradables (plastique, verre, métaux...). Les matériaux sont traités pour être réutilisés sous forme de matière première secondaire.

- **Recyclage** : Le recyclage consiste à transformer des déchets en nouveaux produits ou matières premières, par exemple le recyclage du verre, du papier, du plastique ou des métaux. Il peut être organique ou inorganique selon la nature des matériaux.

I.8.4.2. Valorisation énergétique

La valorisation énergétique consiste à convertir les déchets en énergie, notamment par incinération avec récupération d'énergie. Elle permet la production de :

- Chaleur (réseaux de chauffage urbain),
- Électricité,
- Ou biogaz (dans le cas de la méthanisation).

I.8.5. Le traitement des déchets

Lorsque la valorisation n'est pas possible ou insuffisante, les déchets subissent un traitement pour réduire leur dangerosité ou leur volume avant élimination.

- **Incineration**
Procédé thermique consistant à brûler les déchets à haute température dans des installations spécialisées. Elle permet de réduire le volume des déchets et, dans certains cas, de récupérer de l'énergie (valorisation énergétique).
- **Banalisation**
Ce traitement est appliqué principalement aux déchets d'activités de soins à risques infectieux (DASRI). Il permet de désinfecter les déchets afin qu'ils puissent être éliminés comme des déchets ménagers classiques.
- **Enfouissement (ou stockage)**
Méthode d'élimination ultime consistant à déposer les déchets dans des centres de stockage (décharges) de manière contrôlée. Elle s'applique aux déchets non valorisables ou après traitement préalable.

I.9. Évolution du Cadre Législatif Algérien en Matière de Gestion des Déchets : De la Loi 01-19 à la Loi 25-02

I.9.1. Cadre institutionnel :

A partir de 2001, le gouvernement Algérien a défini une stratégie nationale en matière de protection de l'environnement qui s'est traduite par le plan national d'action pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD).

Sur le volet déchet, le PNAE-DD s'est décliné en deux programmes :

- **Progdem** : Programme de gestion des déchets solides municipaux,
- **Pnagdes** : Plan national de gestion des déchets spéciaux.

A ce titre, le gouvernement s'est lancé sur tout un programme de mise à niveau notamment par :

- Renforcement de l'aspect réglementaire :
Promulgation de la loi 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Renforcement institutionnel :
Par la création d'institutions dédiées à toutes les thématiques environnementales. C'est à ce titre que l'Agence Nationale des Déchets (AND) a été créée. Sa mission principale étant la promotion de la gestion intégrée des déchets.
- Services déconcentrés :
48 directions de l'environnement de wilayas et inspections régionales.
- Introduction de la fiscalité environnementale :

Notamment la taxe d'enlèvement des ordures ménagères (TEOM) et la taxe sur les activités polluantes et dangereuses (TAPD).

L'Algérie, à travers le Progdem et le Pnagdes, a pour objectif de développer à terme une gestion intégrée des déchets. Pour ce faire :

- 135 centres d'enfouissement techniques pour DMA et DI ont été réalisés ou sont en cours de réalisation.

- La plus grande majorité des communes se sont dotées de schémas directeurs pour la gestion des DMA.

- Les grandes décharges publiques ont été éradiquées ou sont en cours de réhabilitation.

Les pouvoirs publics incitent au tri et au recyclage à travers des actions pilotes de tri à la source.

-Aussi, des unités de tri et de déchetteries ont été réalisées.

- Un système public de reprise et de traitement des déchets d'emballages (Eco-Jem) a été instauré.

- Après avoir fait face à une situation d'urgence de gestion des déchets, les pouvoirs publics passent vers une phase qualitative qui consiste en la prévention et au recyclage/valorisation.

- La prévention et le recyclage/valorisation sont les deux axes majeurs de la gestion des déchets qui vont permettre à l'Algérie de réduire sa production des GES.

- Néanmoins, il est proposé d'instaurer une approche participative avec tous les acteurs concernés pour l'élaboration d'un plan d'action en vue d'identifier les actions prioritaires à mettre en œuvre.¹⁶

I.9.2. Cadre réglementaire :

-Loi N 01-19 du 12 Décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

-Loi N 03-10 du 19 juillet 2003, relative la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

-Décret N 02-372 du 11 novembre 2002, relatif aux déchets d'emballages.

-Décret N 02-175 du 20 mai 2002, portant création, organisation et fonctionnement de l'Agence Nationale des Déchets.

-Décret N 04-199 du 19 juillet 2004, fixant les modalités de création, organisation, fonctionnement et de financement du système public de reprise et de valorisation des déchets d'emballages Eco-Jem.¹⁶

I.9.3. Loi n° 01-19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets :

La présente loi a pour objet de fixer les modalités de la gestion, de contrôle et de traitement des déchets, sur la base des principes suivants :

- La prévention et la réduction de la production et de la nocivité des déchets à la source.
- L'organisation du tri, de la collecte, du transport et du traitement des déchets.
- La valorisation des déchets par leur réemploi, leur recyclage et toute autre action visant à obtenir, à partir de ces déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie.
- Le traitement écologiquement rationnel des déchets.
- L'information et la sensibilisation des citoyens sur les risques présentés par les déchets et leur impact sur la santé et l'environnement, ainsi que les mesures prises pour prévenir, réduire ou compenser ces risques.

Les déchets au sens de la présente loi sont classifiés comme suit :

- les déchets ménagers et assimilés; - les déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux; notamment tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui en raison de leur nature et de la composition des matières

qu'ils contiennent ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés et les déchets inertes ; - les déchets inertes, à savoir tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et /ou à l'environnement.¹⁷

- Décret exécutif n° 19-10 du 16 Joumada El Oula 1440 correspondant au 23 janvier 2019 réglementant l'exportation des déchets spéciaux dangereux. 2019-01-23
- Décret exécutif n° 07-205 du 30 juin 2007 fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés. 2007-06-30
- Décret exécutif n° 05-314 fixant les modalités d'agrément des groupements de générateurs et/ou détenteurs de déchets spéciaux. 2005-09-10
- Décret exécutif n° 05-315 fixant les modalités de déclaration des déchets spéciaux dangereux. 2005-09-10
- Décret exécutif n° 04-410 fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations. 2004-12-14
- Décret exécutif n°04-409 fixant les modalités de transport des déchets spéciaux dangereux. 2004-12-14
- Décret exécutif n° 04-210 définissant les modalités de détermination des caractéristiques techniques des emballages destinés à contenir directement des produits alimentaires ou des objets destinés à être manipulés par les enfants. 2004-07-28
- Décret exécutif n° 03-478 définissant les modalités de gestion des déchets d'activités de soins. 2003-12-09
- Décret exécutif n° 03-477 fixant les modalités et les procédures d'élaboration, de publication et de révision du plan national de gestion des déchets spéciaux. 2003-12-09
- Décret exécutif n° 02-372 relatif aux déchets d'emballages. 2002-11-11
- Décret exécutif n° 02-175 portant création, organisation et fonctionnement de l'Agence nationale des déchets. 2002-05-20

I.9.4. La loi n° 25-02 du 21 Chaâbane 1446 correspondant au 20 février 2025 modifie et complète la loi n° 01-19 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets :

Cette loi permettra de renforcer le contrôle global de toutes les étapes de la gestion des déchets et d'instaurer un environnement favorable à l'investissement dans le domaine du recyclage et de transformation des déchets en ressources économiques.

La nouvelle loi comprend plusieurs mesures, notamment :

- L'élaboration de la stratégie nationale de gestion intégrée des déchets.
- La mise en place d'un système numérique pour leur gestion.
- Outre l'introduction de nouvelles définitions inspirées des principes fondamentaux de l'économie circulaire consacrées par les Nations Unies.

- La nouvelle loi établit aussi des outils de planification, tels que l'élaboration du plan national de gestion intégrée des déchets ménagers et assimilés et des déchets inertes, y compris les déchets dangereux.
- De plus, les principes fondamentaux de l'économie circulaire ont été introduits dans cette loi, notamment le principe de Responsabilité élargie du producteur (REP), qui oblige chaque producteur ou détenteur de déchets à valoriser ces déchets.
- Cette nouvelle loi introduit également l'éco-conception, une démarche qui vise à réduire les impacts négatifs des produits sur l'environnement sur l'ensemble de leur cycle de vie, tout en conservant leurs qualités d'usage.
- La loi porte aussi sur une classification pyramidale des modes de traitement des déchets, le remplacement progressif de l'utilisation des produits en plastique à usage unique et la mise en place d'un système adapté par les producteurs et les distributeurs pour encourager les consommateurs à contribuer à la collecte sélective des déchets.

Ce texte de loi comprend également la révision des dispositions pénales et des sanctions pour les rendre plus coercitives.¹⁸

I.10. Impact des déchets :

I.10. Impact sur l'environnement :

La production de déchets constitue l'un des défis environnementaux les plus pressants de notre époque, impactant gravement l'écosystème et la santé humaine.

Les conséquences de la production de déchets sur l'écosystème sont nombreuses. À travers chaque étape du cycle de vie des produits, de la fabrication à l'élimination, des déchets sont générés, entraînant **dégradation des ressources naturelles**¹⁹ et :

- **Pollution des sols :**

Les sols contaminés par des composés toxiques issus des déchets peuvent perdre leur capacité à soutenir la vie végétale, et par conséquent, perturber toute la chaîne alimentaire. Des substances comme les métaux lourds et les produits chimiques industriels peuvent s'infiltrer dans le sol à partir de décharges mal gérées, altérant la fertilité des sols et la santé des écosystèmes locaux.²⁰

- **Impact sur les cours d'eau :**

Les déchets qui atteignent les rivières et les océans peuvent causer de graves dommages aux écosystèmes aquatiques. Les plastiques, produits chimiques et autres déchets ne bloquent pas seulement physiquement les cours d'eau, mais ils introduisent également des toxines et réduisent les niveaux d'oxygène, qui sont essentiels à la vie aquatique. Les effets sont souvent visibles, comme dans le cas des "îles" de plastique dans les océans, qui représentent de grandes concentrations de déchets flottants.²⁰

- **Pollution de l'air : (exemple : changement climatique)**

Les décharges sont une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre, en particulier de méthane. Ce gaz est produit lorsque la matière organique se décompose dans des conditions anaérobies (sans oxygène). Le méthane est beaucoup plus efficace que le dioxyde de carbone pour piéger la chaleur dans l'atmosphère, ce qui en fait un contributeur important au réchauffement climatique. Une gestion correcte de ces gaz est cruciale pour atténuer leur impact climatique.²⁰

I.10.2. Impact sur la santé :

La libération de produits chimiques toxiques et de polluants dans l'air, le sol et les sources d'eau peut entraîner des maladies respiratoires, des cancers et d'autres problèmes de santé chroniques. Les eaux stagnantes présentes dans les déchets favorisent le choléra et les maladies vectorielles telles que le paludisme et la dengue.²¹

I.11. Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases essentielles à la compréhension de la problématique des déchets en présentant leurs définitions, leurs différentes classifications. L'étude de ces typologies montre clairement la diversité des déchets et l'importance d'une gestion différenciée et adaptée. La gestion des déchets, quant à elle, s'inscrit aujourd'hui comme un enjeu stratégique tant sur le plan environnemental que sanitaire. En effet, une mauvaise gestion peut engendrer des conséquences graves sur les écosystèmes, la qualité des sols, de l'eau, de l'air, et par extension, sur la santé humaine. Les cadres juridiques algériens, notamment la loi 01-19 et la loi 02-25, témoignent d'une volonté institutionnelle de structurer ce secteur à travers des principes de prévention, de valorisation, de traitement et d'élimination contrôlée.

Ainsi, ce socle théorique permet d'appréhender les enjeux liés aux déchets non seulement comme une problématique technique, mais aussi comme un défi multidimensionnel intégrant des aspects réglementaires, sanitaires et environnementaux. Il constitue une base solide pour aborder, dans les chapitres suivants, les pratiques de gestion actuelles, les limites observées et les pistes d'amélioration envisageables dans le contexte national.

Références bibliographiques :

- (1) Larousse, É. *Définitions : déchet, déchets - Dictionnaire de français Larousse*. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/d%C3%A9chet/22142> (accessed 2025-05-03).
- (2) *Définitions de la terminologie réglementaire*. Agence Nationale des Déchets. <https://and.dz/base-des-connaissances/definitions/> (accessed 2025-05-03).
- (3) *Réglementation générale déchets*. https://www.ordeco.org/reglementation-generale?fbclid=IwY2xjawKEu5lleHRuA2FlbQIxMABicmlkETFsWVFqdzk5ZHdsWjZIR1pyAR5Emgb041LTv5WV6OG6Hjy59ViaN-qbWrPPYO62pXIF7HshL-QzF1PRw2WvAw_aem_XVBDp5ToFBnrtRW1sI2K_A (accessed 2025-05-04).
- (4) *Définition de Déchet*. Actu-Environnement. https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dechet.php4 (accessed 2025-05-04).
- (5) Bertolini, G. Qu'est-ce qu'un déchet ? Le droit européen rejette l'acception économique. *Environ. Ingénierie Dév.* **1998**, N°12-4ème Trimestre 1998, 8201. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.906>.
- (6) Guide Dechet. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.dgdr.cnrs.fr/sst/cnps/guides/doc/dechets/guidedechets.pdf&ved=2ahUKEwj1z7zz64mNAxUFT6QEHLyOn8QFnoECCAQAQ&usg=AOvVaw3cmTRJnuprfwPnT_ffihAb (accessed 2025-05-04).

- (7) Dr. BAZRI K.E.D. Cour Univ Constantine1.
<https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/becol/2022/Cours%20Pollution%20par%20les%20d%C3%A9chets.%20BAZRI.pdf> (accessed 2025-05-04).
- (8) Chapitre01_univ_msila. https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/287996/mod_resource/content/1/chapitre01.pdf (accessed 2025-05-04).
- (9) Journal Officiel.
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.joradp.dz/FTP/Jo-Francais/2001/F2001077.pdf&ved=2ahUKEwj6zufd8omNAxUeVKQEHZ_ONuQQFnoECBIQBg&usg=AOvVaw1oT66NTatYjvQDnKewVa5m (accessed 2025-05-04).
- (10) Auvergne-Rhône-Alpes, D. *Classification et traçabilité des déchets*. DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. <https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/classification-et-tracabilite-des-dechets-a13138.html> (accessed 2025-05-03).
- (11) *Qu'est-ce que le Catalogue Européen des Déchets (CED) et à quoi sert-il ? – ScrapAd*. <https://scrapad.com/fr/blog/quest-ce-que-le-catalogue-europeen-des-dechets-et-a-quoi-sert-il/> (accessed 2025-05-03).
- (12) Liste de codification des déchets (Annexe II de l'article R. 541-8 du CE).
- (13) *Gestion des déchets : principes généraux | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique*. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/gestion-dechets-principes-generaux> (accessed 2025-05-03).
- (14) *Exposé gestion et valorisation des déchets*. SlideShare.
<https://fr.slideshare.net/slideshow/expos-gestion-et-valorisation-des-dchets/87637804> (accessed 2025-05-04).
- (15) CLIC1000, L. *Gestion et caractérisation des déchets urbains solides*. Documents pour tous. <https://www.clicours.com/gestion-et-caracterisation-des-dechets-urbains-solides/> (accessed 2025-05-04).
- (16) *Cadre institutionnel et réglementaire*. Agence Nationale des Déchets.
<https://and.dz/presentation/cadre-institutionnel-et-reglementaire/> (accessed 2025-05-04).
- (17) *Loi n° 01-19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets*. | FAOLEX.
https://www.fao.org/faolex/results/details/fr/c/LEX-FAOC043228/?fbclid=IwY2xjawKDIQdleHRuA2FlbQIxMABicmlkETFDcXc3dWFxejViaEl1NHZNAR63FzXDb8sLqHuOE2rrIOlkL-QSdowF67UEnyvB0bnmd3gFUbOI5rF_UbHuQ_aem_9_z-8LTLVXkyWLtAZGhkXA (accessed 2025-05-04).
- (18) sabrine. *Adoption du texte de loi relatif à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets*. وزارة البيئة وجودة الحياة. <https://www.me.gov.dz/fr/adoption-du-texte-de-loi-relatif-a-la-gestion-au-contrôle-et-a-lélimination-des-dechets/> (accessed 2025-05-04).
- (19) *Les conséquences de la production de déchets sur l'écosystème*. idverde.
<https://idverde.fr/blog/les-consequences-de-la-production-de-dechets-sur-lecosysteme/> (accessed 2025-05-03).
- (20) *Comment les déchets affectent-ils l'environnement ? | Contelologic*.
<https://contelologic.com/fr/comment-les-dechets-affectent-ils-lenvironnement/> (accessed 2025-05-03).
- (21) *DGB | L'importance et l'impact de la gestion des déchets*.
https://www.green.earth/fr/waste-management?fbclid=IwY2xjawKDLW5leHRuA2FlbQIxMABicmlkETFWZHJCVDJQYlBFRHZPSjhaAR7agS_5eADhh05IcrA9JoRVueU0rY0sHDK7QmjQFBhwitQc_8LZYf0GWcy1jQ_aem_weIHVtkX6ufcCzV_a39UPQ (accessed 2025-05-03).

- (22) Pense-Lheritier, A.-M. Innovation et éco-conception pour les produits de l'industrie cosmétique. *Marché Organ.* **2013**, 17 (1), 137–147.
<https://doi.org/10.3917/maorg.017.0137>.
- (23) *Industrie cosmétique : définition, challenges et conseil.* Sneci.
<https://www.sneci.com/nos-secteurs-intervention/cosmetique/> (accessed 2025-05-14).
- (24) *Industrie pharmaceutique : définition, challenges et conseil.* Sneci.
<https://www.sneci.com/nos-secteurs-intervention/sante-et-pharmaceutique/> (accessed 2025-05-16).
- (25) *Chapitre 79 - L'industrie pharmaceutique.* <https://ilocis.org/fr/documents/ilo079.htm> (accessed 2025-05-16).
- (26) Hamdouch, A.; Depret, M.-H. Coalitions industrielles, réseaux de firmes et dynamiques de concurrence-coopération dans les secteurs en cours de globalisation : le cas de l'industrie pharmaceutique. *Cah. Maison Sci. Econ.* **2000**.
- (27) *Découvrez le secteur de la parapharmacie - Dossier complet.* https://www.go-sidely.com/post/secteur-parapharmacie?fbclid=IwY2xjawKVvV1leHRuA2FlbQIxMABicmlkETFGMmZZd0RpUGRSekp2TVZ6AR6E_EkXHqO5i06xMHm3XwLNWKP29yc-hCUU2h0N1QPS0LdGcgk_INSSsZh19w_aem_cVJb1HEL7NPR2-ozw_IN_w (accessed 2025-05-17).
- (28) Fabrication et Contrôle de Qualité d'un Produit Parapharmaceutique : « Compresse Stérile ». <http://dspace.univ-bouira.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/10469/1/Fabrication%20et%20contr%C3%B4le%20de%20qualit%C3%A9%20d%E2%80%99un%20produit%20pharmaceutique%20compresse%20sterile.pdf> (accessed 2025-05-17).
- (29) Préparation et Caractérisation d'un Charbon Actif à Partir Des Tiges Des Roseaux Par Voie Chimique, 2020. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29291/1/MIMOIRE%20Final.pdf> (accessed 2025-05-17).
- (30) *Qu'est-ce que du charbon actif?* https://www.yokodesign.fr/fr/journal/qu-est-ce-que-du-charbon-actif-.html?fbclid=IwY2xjawKV8AtleHRuA2FlbQIxMABicmlkETE3VGdQeUp3ZzRkeG50eWNwAR5fgc_Nd317FS0OcXmCaWGIg5jDaDLcjcyC1LjGOCD03qLbBzvLAfFUvJcpQ_aem_H4eNmJsITh4zIMWOjwQLIA (accessed 2025-05-17).
- (31) *Matières premières pour la production et la classification des charbons actifs* ✓. Greenpower. <https://greenpower.equipment.fr/articles/matieres-premieres-pour-la-production-et-la-classification-des-charbons-actifs/> (accessed 2025-05-17).
- (32) *Durabilité et charbons actifs - fabrication, utilisation et élimination* - CarboTech Gruppe. <https://www.carbotech.de/fr/nouvelles-fr/durabilite-et-charbons-actifs-fabrication-utilisation-et-elimination/> (accessed 2025-05-18).
- (33) Abdelmalek, khaoula; Boufarou, hadjer. Préparation et caractérisation d'un charbon de marc de café, Larbi TEBESSI-Tébessa, 2020. <http://oldspace.univ-tebessa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1381> (accessed 2025-06-14).
- (34) BRIKCI NIGASSA, H. Etude physicochimique et effets biologiques de « la poudre de noyau de dattes » chez le rat Wistar, ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN, 2020. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/16547/1/BrikciNigassa.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (35) *Les bienfaits et utilisations des noyaux de dattes - L'écho Tunisien.* <https://lehotunisien.com/les-bienfaits-et-utilisations-des-noyaux-de-dattes/> (accessed 2025-06-14).

- (36) *Study of chemical composition of date stones for use in animal feed.*
<http://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd21/5/boud21069.htm> (accessed 2025-06-14).
- (37) Boussena, Z. Etude de la composition chimique et microbiologique de noyaux de variétés de dattes Algériennes en vue de la valorisation dans le domaine alimentaire. Thesis, univ.blida1, 2012. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/6781> (accessed 2025-06-14).
- (38) Boussena, Z.; Khali, M. Extraction et composition chimique d'huile de noyaux de dattes algériennes. [Extraction and chemical composition of algerian date seeds oil]. *Nutr. Santé* **2016**, 5 (2), 100–106.
- (39) Benakli, L. Valeur nutritive de la poudre de noyaux de dattes, Université Mouloud Mammeri, 2021. <https://dspace.ummto.dz/handle/ummto/18906> (accessed 2025-06-14).
- (40) *Analyse de matériaux par DRX (Diffraction des Rayons X)*. FILAB. <https://filab.fr/nos-moyens-techniques/analyse-et-caracterisation-des-materiaux-par-diffraction-des-rayons-x-drx-en-laboratoire/filab-caracterise-vos-mineraux-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (41) *Analyse DRX en laboratoire - YesWeLab - Blog*. <https://blog.yeswelab.fr/plantes-cosmetiques/analyse-drx-laboratoire/> (accessed 2025-06-14).
- (42) *Décrypter la Cristallinité : Analyse des Poudres par DRX en Laboratoire*. <https://bplc.fr/laboratoire-dessais/services-et-prestations-des-laboratoires-dessais/prestation-de-laboratoire-de-chimie-analytique-et-organique/analyses-en-laboratoire-de-caracterisation-et-cristallinite-des-poudres-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (43) Fiche-N°6-Appareil-BET.Pdf. <https://www.fs-umi.ac.ma/wp-content/uploads/2020/10/Fiche-N%C2%B06-Appareil-BET.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (44) *Analyse de porosité BET - Département de chimie - Université de Sherbrooke*. <https://www.usherbrooke.ca/chimie/services/thermomecanique/bet> (accessed 2025-06-14).

CHAPITRE 2 :

L'industrie pharmaceutique,
parapharmaceutique et
cosmétique

II. Chapitre I : l'industrie pharmaceutique, parapharmaceutique et cosmétique

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'industrie cosmétique, l'industrie pharmaceutique et l'industrie parapharmaceutique, en définissant chacune d'elles, en identifiant les différents types d'acteurs qui y interviennent, ainsi que les produits qu'elles développent. Nous mettons ensuite l'accent sur le charbon actif, une substance utilisée dans ces trois domaines pour ses propriétés particulières. Nous en donnons une définition, présentons ses différents types, ses formes, ses propriétés ainsi que ses principales utilisations. Enfin, nous décrivons les étapes de sa préparation, en soulignant son importance croissante dans les formulations modernes.

II.2. Industrie cosmétique :

II.2.1. Définition :

L'industrie cosmétique regroupe la recherche, production et vente de produits de soins personnels (peau, cheveux, maquillage, parfums, hygiène), avec un secteur en constante évolution et divers segments spécialisés.

L'industrie cosmétique, également connue sous le nom de secteur des cosmétiques, englobe l'ensemble des activités et des entreprises impliquées dans la recherche, le développement, la production et la commercialisation de **produits** destinés aux **soins personnels** et à **l'embellissement**. Ce secteur dynamique, en constante évolution, est composé de nombreux segments, notamment les soins de la peau, les soins des cheveux, les produits de maquillage, les parfums, et les produits d'hygiène.

II.2.2. Un produit cosmétique :

Selon le code de la santé publique (article L658-1) « **un produit cosmétique** est une substance ou préparation destinée à être mise en contact avec les diverses parties superficielles du corps humain, par exemple, la peau, les cheveux, les ongles, les lèvres ou encore les dents, en vue, exclusivement ou principalement, de les nettoyer, de les parfumer, d'en modifier l'aspect, de les protéger, de les maintenir en bon état ou d'en corriger les odeurs ». ²²

Par conséquent un produit cosmétique mis sur le marché européen doit respecter plusieurs réglementations telles que :

- La Directive Cosmétiques (76/768/EEC) relative aux produits cosmétiques. Cette directive européenne établit une liste de plus de 1300 substances interdites et la concentration maximum à autoriser pour certains ingrédients. Le 11 juillet 2013, elle est remplacée par le règlement Européen 1223/2009 qui, parmi les changements, met encore plus de poids sur le profil toxicologique du produit cosmétique et de ses ingrédients.
- La réglementation européenne REACH qui concerne l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des substances chimiques applicables à la fabrication, à la mise sur le marché et à l'utilisation de ces substances. La mise en place de la réglementation REACH permet une réévaluation de la sécurité des ingrédients tant sur l'homme que sur l'environnement.

Enfin, les fabricants, importateurs ou responsables de la mise sur le marché des produits cosmétiques, assument la responsabilité de la sécurité de leurs produits par la mise à

disposition des autorités européennes d'un dossier comprenant l'évaluation de la sécurité pour la santé humaine.

L'industrie cosmétique est donc une industrie très sensible à la sécurité de ses produits et elle a rapidement compris que les modifications réglementaires que cela entraînait n'étaient pas un frein à l'innovation mais plutôt un levier. Si pendant longtemps elle n'a envisagé dans ces processus de développement que l'évaluation de la sécurité humaine, le processus REACH lui a permis de s'approprier la vision environnementale au travers du suivi de l'écotoxicité de ces ingrédients. Son nouveau défi est maintenant de décrypter et d'intégrer le processus d'éco-conception dans sa démarche d'innovation.²²

Il s'agit d'un **écosystème complexe** qui repose sur la collaboration de multiples acteurs : des grands fabricants aux marques indépendantes, en passant par les fournisseurs d'ingrédients, les prestataires de services de fabrication, les fabricants d'équipements et d'emballages, les distributeurs et les régulateurs. Ensemble, ils forment une chaîne de valeur intégrée qui s'efforce de répondre aux attentes des consommateurs en matière de qualité, d'innovation et de durabilité. La synergie entre ces acteurs est essentielle pour continuer à stimuler la croissance et l'innovation dans le secteur cosmétique.

II.2.3. Les différents types d'acteurs de l'industrie cosmétique :

L'industrie des cosmétiques regroupe divers acteurs qui collaborent pour créer, produire et commercialiser une vaste gamme de produits de beauté et de soins personnels. Voici les principaux types d'intervenants de ce secteur industriel :

II.2.3.1. Fabricants de produits cosmétiques :

- **Grandes multinationales :**

Des entreprises comme L'Oréal, Estée Lauder, Procter & Gamble et Shiseido dominent le marché avec leurs vastes gammes de produits couvrant les soins de la peau, les soins capillaires, les produits de maquillage et les parfums. Elles investissent massivement dans la recherche et le développement pour innover continuellement et répondre aux exigences des consommateurs.

- **Marques indépendantes et artisanales :**

Des marques telles que L'Occitane, Lush et Drunk Elephant se spécialisent souvent dans des niches spécifiques, mettant l'accent sur les produits naturels, biologiques ou vegan. Elles apportent diversité et innovation au marché, répondant à une demande croissante pour des produits éthiques et durables.

II.2.3.2. Fournisseurs d'ingrédients et de matières premières :

- **Producteurs de matières premières :**

Des entreprises comme BASF, Croda et Givaudan fournissent des ingrédients essentiels tels que les actifs hydratants, les émulsifiants, les conservateurs et les parfums. Ils jouent un rôle crucial dans la formulation des produits cosmétiques, en offrant des matières premières innovantes et conformes aux différentes réglementations.

- **Fournisseurs de solutions innovantes :**

Des fournisseurs comme Symrise et DSM se spécialisent dans le développement d'ingrédients actifs à base de biotechnologie et d'extraits naturels, contribuant à l'efficacité et à l'attrait des produits finaux.

II.2.3.3. Prestataires de services de fabrication (CMO) :

- **Sociétés sous-traitantes :**

Des fabricants sous contrat comme Fareva et Intercos offrent des services de production aux marques, depuis le développement de la formulation jusqu'à la mise en

bouteille et l'emballage. Ils permettent aux marques de luxe et aux nouvelles entreprises de manière rapide et flexible.

- **Laboratoires de recherche :**

Des entreprises spécialisées comme Seppic et Silab réalisent la recherche et le développement de formulations innovantes, intégrant des ingrédients avancés et répondant aux tendances du marché.

II.2.3.4. Fabricants d'équipements et d'emballages :

- **Producteurs d'équipements de production :**

Des entreprises comme Kronos et IMA fournissent des machines de remplissage, de conditionnement et de mélange pour les produits cosmétiques, garantissant des processus de production efficaces et de haute qualité.

- **Fournisseurs d'emballages :**

Des sociétés comme Albéa et Aptar créent des solutions d'emballage innovantes et durables, en mettant l'accent sur le design, l'ergonomie et la réduction de l'empreinte écologique. Leurs solutions d'emballage contribuent à l'attrait visuel et à la fonctionnalité des produits cosmétiques.

II.2.3.5. Organismes de régulation et associations professionnelles :

- **Régulateurs nationaux et internationaux :**

Des entités comme la Food and Drug Administration (FDA) aux États-Unis, la commission européenne impose des normes strictes pour garantir la sécurité et l'efficacité des produits cosmétiques. Ils jouent un rôle clé pour garantir que les produits vendus sur le marché respectent des critères de conformité et de sécurité rigoureux.

- **Associations professionnelles :**

Des organisations comme la FEBEA (Fédération des entreprises de la beauté) en France, Cosmetics Europe et la Personal Care Products Council (PCPC) au niveau international, représentent les intérêts de l'industrie cosmétique. Elles facilitent la collaboration entre les entreprises, promeuvent les meilleures pratiques et travaillent sur des propositions de cadres réglementaires incluant les enjeux environnementaux.

II.2.4. Les challenges de l'industrie cosmétique pour 2030 et au-delà :

Le secteur des produits de soin est confronté à de nombreux défis qui redéfinissent ses pratiques et ses orientations stratégiques :

- ✓ Durabilité et décarbonation.
- ✓ Innovation technologique.
- ✓ Évolution des attentes des consommateurs.
- ✓ Régulation et sécurité des produits.²³

II.3. L'industrie pharmaceutique :

II.3.1. Définition :

L'**industrie pharmaceutique** est un secteur vital de la santé mondiale, dédié à la **découverte, au développement, à la production et à la commercialisation de médicaments** destinés à prévenir, traiter et guérir diverses maladies. Elle joue un rôle crucial en améliorant la qualité de vie des populations et en augmentant l'espérance de vie grâce à des avancées médicales constantes.

Définie comme l'**ensemble des entreprises et des institutions engagées dans la recherche et la fabrication de produits thérapeutiques**, l'industrie pharmaceutique couvre un large spectre de médicaments, allant des petites molécules chimiques aux biotechnologies

innovantes comme les thérapies géniques et les vaccins. Les activités de ce secteur incluent la recherche fondamentale et appliquée, les essais cliniques rigoureux pour évaluer la sécurité et l'efficacité des médicaments, ainsi que la mise en conformité avec des réglementations strictes pour assurer la sécurité des patients.²⁴

Les termes ci-après sont fréquemment employés dans l'industrie pharmaceutique :

- **Agents biologiques** : vaccins d'origine bactérienne ou virale, antigènes, antitoxines et produits analogues, sérums, plasmas et autres dérivés sanguins utilisés à des fins préventives ou curatives chez l'humain et chez l'animal.
- **Agents diagnostiques** : produits utilisés pour aider à dépister les maladies et les troubles chez l'humain ou chez l'animal. Il peut s'agir de produits chimiques inorganiques destinés à étudier le tractus digestif, de produits chimiques organiques permettant de visualiser l'appareil circulatoire ou le foie, ou encore de composés radioactifs pour étudier le fonctionnement d'un système organique.
- **Excipients** : constituants inertes incorporés à des substances médicamenteuses dans une présentation pharmaceutique. Les excipients peuvent influencer sur la vitesse d'absorption, la dissolution, la libération, le métabolisme et la distribution chez l'humain ou chez l'animal.
- **Médicaments** : substances possédant des propriétés pharmacologiques actives chez l'humain et chez l'animal. Les médicaments sont associés à d'autres produits, tels que des excipients, pour donner des produits à usage médicamenteux.
- **Médicaments sur ordonnance** : agents biologiques ou chimiques destinés à prévenir, diagnostiquer ou traiter des maladies ou des troubles chez l'humain et chez l'animal, délivrés sur ordonnance ou avec l'autorisation d'un médecin, d'un pharmacien ou d'un vétérinaire.
- **Pharmacie** : art et science de la préparation, du contrôle et de la délivrance des médicaments destinés à prévenir, diagnostiquer ou traiter des maladies ou des troubles chez l'humain et chez l'animal.
- **Pharmacocinétique** : étude du devenir des médicaments dans l'organisme, c'est-à-dire des processus métaboliques liés à l'absorption, la distribution, la biotransformation et l'élimination d'un médicament chez l'humain et chez l'animal.
- **Pharmacodynamie** : étude de l'action exercée par les médicaments sur l'organisme sain, en fonction de leur structure chimique et de leur lieu d'action, et analyse de leurs répercussions biochimiques et physiologiques chez l'humain et chez l'animal.
- **Présentations pharmaceutiques en vente libre** : produits médicamenteux vendus dans une pharmacie ou dans un magasin et dont la délivrance ne nécessite ni ordonnance ni autorisation d'un médecin, d'un pharmacien ou d'un vétérinaire.
- **Principes actifs** : substances ayant un pouvoir thérapeutique.
- **Produits chimiques de base** : principes actifs utilisés pour fabriquer des produits sous forme pharmaceutique (galénique), des aliments pour animaux ayant des propriétés thérapeutiques, ou encore des médicaments ne pouvant être délivrés que sur ordonnance.²⁵

II.3.2. Les différents types d'acteurs de l'industrie pharmaceutique :

L'industrie pharmaceutique est un vaste écosystème impliquant divers types d'acteurs, chacun jouant un rôle crucial dans la chaîne de valeur de la découverte, du développement, de la production et de la distribution de médicaments. Ces acteurs peuvent être catégorisés en plusieurs groupes : les entreprises pharmaceutiques, les biotechnologies, les organismes de recherche académique, les sous-traitants en fabrication, les prestataires de services contractuels, les organismes de réglementation et les distributeurs.

II.3.2.1. Entreprises pharmaceutiques :

Ces acteurs sont les principaux **moteurs de l'innovation** en santé. Ils englobent des multinationales telles que Pfizer, Sanofi, Merck, et GlaxoSmithKline, qui disposent de **ressources considérables** pour mener des recherches fondamentales et cliniques, produire des médicaments à grande échelle et les commercialiser sur un marché mondial. Ils travaillent sur une variété de produits, des petites molécules aux biopharmaceutiques complexes.

II.3.2.2. BioTech : entreprises de biotechnologies :

Ces startups et petites entreprises se concentrent principalement sur les biothérapies et les **technologies émergentes** comme la thérapie génique et les anticorps monoclonaux. Souvent issues de collaborations académiques, elles sont à la **pointe de l'innovation** grâce à leur agilité et leur capacité à exploiter de nouvelles découvertes scientifiques.

II.3.2.3. Organismes de recherche académique :

Universités et instituts de recherche jouent un rôle essentiel dans les **premières étapes** de la découverte de médicaments. Ils fournissent les **bases scientifiques** indispensables et sont souvent partenaires dans des **projets de recherche coopératifs** financés par l'industrie pharmaceutique.

II.3.2.4. Sous-traitants en fabrication (CDMO) :

Les Organisations de développement et de fabrication sous contrat (CDMO) fournissent des services de fabrication, du développement du produit à la production à grande échelle, permettant aux entreprises pharmaceutiques de **sous-traiter certaines étapes** de production et de se concentrer sur leur cœur de métier.

II.3.2.5. Prestataires de services contractuels (CRO) :

Les Organisations de recherche contractuelle (CRO) fournissent des **services externalisés** pour la gestion des **essais cliniques** et la **recherche**, soutenant les entreprises pharmaceutiques et biotechnologiques dans l'évaluation de la sécurité et de l'efficacité de nouveaux traitements.

II.3.2.6. Organismes de réglementation :

L'EMA (Agence européenne des médicaments) en Europe, la FDA (Food and Drug Administration) aux États-Unis, et d'autres **agences nationales régulent** strictement les médicaments pour assurer leur **sécurité** et leur **efficacité**, en supervisant les essais cliniques et en approuvant les nouveaux médicaments pour la mise sur le marché.

II.3.2.7. Distributeurs et grossistes :

Une fois les médicaments fabriqués, ils doivent être distribués aux pharmacies, hôpitaux et cliniques. Des entreprises comme McKesson, AmerisourceBergen, et Cardinal Health jouent un rôle clé dans la **distribution** et la **logistique pharmaceutique**, garantissant que les médicaments atteignent les patients en toute sécurité et rapidement.²⁴

II.3.4. Les challenges de l'industrie pharmaceutique pour 2030 :

L'industrie pharmaceutique est confrontée à des problématiques complexes qu'elle va devoir affronter dans les années à venir :

- **Ruptures d'approvisionnement** : La pandémie de COVID-19 a mis en lumière la fragilité et la complexité des chaînes d'approvisionnement mondiales. Les entreprises doivent renforcer la résilience de leurs chaînes d'approvisionnement pour **garantir la disponibilité continue des médicaments**, en diversifiant les sources et en intégrant des technologies de traçabilité avancées.
- **Innovation et R&D** : La découverte de nouveaux traitements devient de plus en plus difficile et coûteuse. Les compagnies pharmaceutiques doivent investir massivement dans la recherche et le développement et explorer des domaines tels que les thérapies géniques, l'intelligence artificielle... Une des problématiques majeures demeure la

capacité à déboucher sur des **thérapies à valeur ajoutée pour le patient**. L'enjeu est l'accélération et la **mobilisation des moyens** sur les **pistes les plus prometteuses**. L'IA pourra notamment être utilisée dans le screening et les études cliniques.

- **Conformité réglementaire** : La conformité avec des réglementations de plus en plus strictes reste un défi majeur. La FDA, l'EMA et d'autres agences de réglementation imposent des **exigences rigoureuses** en matière de **sécurité**, d'**efficacité** et de **qualité** des produits. Les entreprises doivent respecter ce paysage réglementaire complexe tout en accélérant le temps de mise sur le marché des médicaments.
- **Accessibilité et coût des médicaments** : À mesure que les traitements deviennent plus sophistiqués, les coûts de développement et de production augmentent. Assurer que ces **médicaments restent accessibles** et abordables est un enjeu crucial. Les entreprises doivent trouver un équilibre entre rentabilité et accès équitable aux traitements, en explorant des modèles économiques tels que les partenariats public-privé et les programmes de prix différenciés.
- **Personnalisation des traitements** : La médecine personnalisée, basée sur l'analyse des données génétiques et moléculaires de chaque patient, représente une avancée majeure mais pose des défis en termes de développement, de production et de réglementations. Les infrastructures de fabrication doivent s'adapter pour produire des **traitements sur mesure** à grande échelle.
- **Résistance aux antibiotiques** : La résistance croissante aux antibiotiques est une menace mondiale. L'industrie de la santé doit investir dans la recherche de nouveaux antimicrobiens, de vaccins et de traitements alternatifs pour combattre les infections résistantes. La **collaboration internationale** sera essentielle pour surmonter ce **problème de santé publique**.
- **Transformation numérique et données** : L'ère numérique apporte des opportunités pour améliorer les processus de développement, les **essais cliniques**, la **qualité et les laboratoires QC/QA**, ainsi que la **gestion des données de santé**. Cependant, la gestion sécurisée des données, la protection de la vie privée des patients et l'intégration de l'IA dans les processus réglementés constituent des challenges de taille. ²⁴

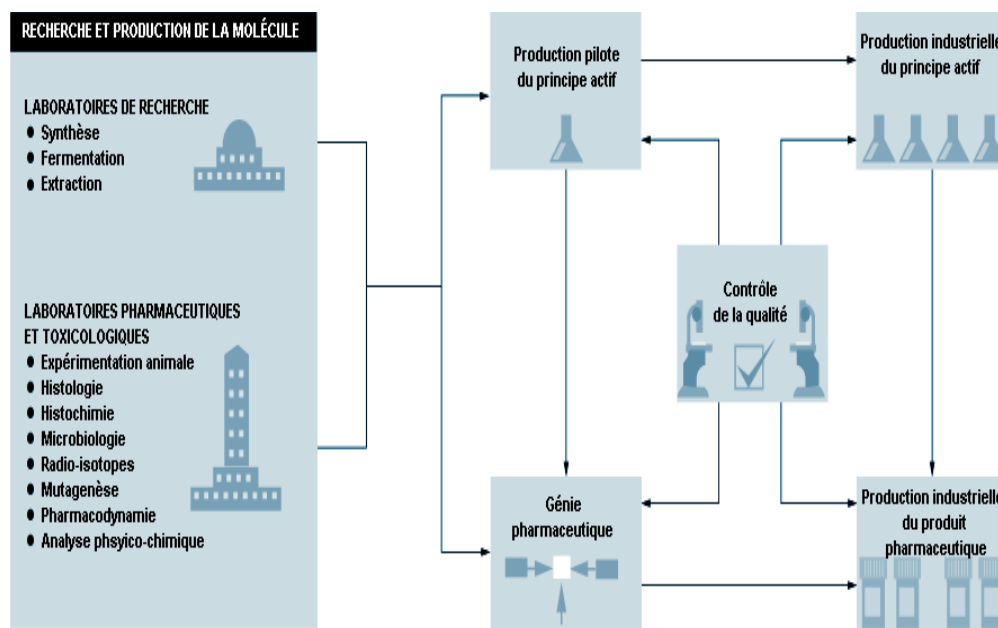


Figure 2: Mise au point d'un médicament dans l'industrie pharmaceutique. ²⁵

On observe dans l'industrie pharmaceutique un réseau complexe de **réglementations** qui interviennent au moins à **cinq niveaux** : ²⁶

- Au niveau de la recherche, les laboratoires doivent respecter un certain nombre de règles internationales ("Bonnes Pratiques de Laboratoires" et "Bonnes Pratiques Cliniques"). Ainsi, la Dénomination Commune Internationale (D.C.I.) du médicament ne sera accordée que si le laboratoire et le centre d'essais cliniques sont agréés.
- Au niveau de la fabrication, toute société souhaitant fabriquer, importer, exporter, distribuer ou exploiter des médicaments devra respecter des normes internationales ("Bonnes Pratiques de Fabrication").
- En aval, l'Autorisation de Mise sur le Marché (A.M.M.) ne sera délivrée par l'autorité de tutelle que si le médicament répond aux exigences de qualité, d'efficacité, d'innocuité et de nécessité thérapeutique.
- L'A.M.M. déterminera le classement du médicament dans sa catégorie d'accessibilité, et ainsi, ses conditions d'accès à la publicité, étroitement réglementée et la nature de sa demande.
- Son succès commercial dépendra alors de l'opinion du corps médical (le vrai décideur de la consommation) plus que de son prix. Par contre, l'échec tiendra souvent à un rejet du médicament par les patients, soit parce que son taux de remboursement est trop faible, soit parce que la "nature" refuse le médicament.

Toutes ces réglementations pèsent considérablement sur l'industrie pharmaceutique. L'innovation est ainsi étroitement encadrée par des considérations éthiques, les capacités potentielles de production et de commercialisation sont limitées par les politiques de régulation des dépenses de santé, et le jeu combiné des autorisations de mise sur le marché, des règles de prescription et de remboursement empêche une confrontation directe de l'offre et de la demande. Cependant, aussi contraignantes soient-elles, les dispositions réglementaires produisent parallèlement une série d'effets positifs significatifs. En particulier, la sécurité sanitaire favorise la qualité de l'offre et la confiance de la demande. De même, les règles de précaution tendent à être reconnues par tous et à s'harmoniser par le haut, même si le "différentiel" réglementaire (entre pays ou zones) continue à être à l'origine de distorsions concurrentielles parfois significatives. On notera, enfin, que l'activité pharmaceutique n'aura jamais été aussi florissante qu'aujourd'hui, alors même que les précautions réglementaires se font de plus en plus sentir... ²⁶

II.4. L'industrie parapharmaceutique :

II.4.1. Définition :

La **parapharmacie**, Née dans les années 80, la parapharmacie englobe les produits de soins, de beauté et de bien-être, non catégorisés comme des médicaments ²⁷. Elle comprend des matières ou des compositions, objets et appareils qui ne répondent pas directement à la définition du médicament, et qui ne sont pas enregistrés comme médicament, mais qui peut avoir un intérêt thérapeutique ou qui sont nécessaires pour administrer un médicament ou un traitement. ²⁸

II.4.2. Produits parapharmaceutiques :

Les **produits parapharmaceutiques** sont des produits et accessoires de cosmétiques, d'hygiène corporelle et des produits de diététiques courants, vendus sans prescription médicale. ²⁸

II.4.3. Différence entre produit pharmaceutique et parapharmaceutique :

Un produit est considéré comme médicament s'il est destiné à traiter, prévenir ou diagnostiquer une maladie ou un trouble de la santé spécifique. La commercialisation fait suite à un processus d'évaluation et d'autorisation (AMM), garantissant leur sécurité, leur efficacité et leur qualité. Les produits de parapharmacie, destinés uniquement à des fins de bien-être, de beauté ou de soins personnels sans prétendre traiter des maladies, ne sont pas classés comme médicaments.

II.4.4. Catégories :

Sur la base des critères définis, le conseil national de l'ordre des Pharmaciens propose la classification suivante pour les produits et articles qui peuvent être disponibles dans les officines ouvertes au public.

- Désinfection et lavage (exemple : produits de décontamination, produits de désinfection, solutions de lavage) ;
- Diététique, régime et nutrition (exemple : compléments alimentaires, produits de régime hypocaloriques, solution sucrée à visée antalgique) ;
- Hygiène et cosmétologie (exemple : produits de soins, cheveux, corps, hygiènes buccodentaire, maquillage, nourrissons) ;
- Réactifs et tests (exemple : lecteurs de glycémie, test de grossesse, test de coagulation).
- Accessoires et matériel médical (exemple : accessoires pour diabète, accessoires pour immobilisation, adjuvants de la cicatrisation, injections, pansements).²⁸

II.5. Les produits communs :

L'industrie cosmétique, pharmaceutique et parapharmaceutique partagent plusieurs matières premières d'origine naturelle ou organique, utilisées pour leurs propriétés fonctionnelles (comme excipients, actifs ou conservateurs). Parmi elles, trois matières se démarquent par leur présence croisée dans les trois secteurs :

II.5.1. La Cellulose – Excipient et structurant naturel

- **En cosmétique** : elle structure les textures (crèmes, gels, masques en tissu).
- **En parapharmacie** : elle sert d'excipient (comprimés, pommades) ou d'agent de texture. → Elle joue un rôle de support ou d'épaississant dans les deux industries, ce qui en fait une matière première commune et multifonctionnelle.
- **En pharmacie** : elle est largement utilisée comme excipient dans les formes orales solides (comprimés, gélules), pour ses propriétés de liant ou de désintégrant.

II.5.2. Le Charbon actif – Actif purifiant naturel

- **En cosmétique** : il est utilisé pour purifier la peau (masques, savons).
- **En parapharmacie** : il est utilisé comme absorbant intestinal. → Son pouvoir d'absorption des toxines le rend utile à la fois sur la peau et dans le système digestif, ce qui crée une synergie d'usage entre les deux domaines.
- **En pharmacie** : il est intégré dans des médicaments destinés à traiter les intoxications ou les troubles digestifs (charbon médicinal).

II.5.3. L'Alcool (éthanol) – Solvant et antiseptique

- **En cosmétique** : utilisé comme solvant ou agent antiseptique léger dans certaines lotions.

- **En parapharmacie** : base des solutions hydroalcooliques et des désinfectants. → Sa fonction désinfectante et de solvant en fait une matière première indispensable aux trois secteurs, surtout pour les produits à usage externe.
- **En pharmacie** : utilisé comme solvant pour principes actifs, agent antimicrobien dans les préparations magistrales et composant de désinfectants à usage médical.

Les matières comme la cellulose, le charbon actif et l'alcool illustrent parfaitement la mise en commun des ressources naturelles et fonctionnelles entre les industries cosmétique, pharmaceutique et parapharmaceutique. Elles remplissent souvent le même rôle (texture, purification, antisepsie) ou des rôles complémentaires selon la finalité du produit (esthétique ou thérapeutique).

Après avoir présenté plusieurs matières premières utilisées conjointement dans les domaines cosmétique et parapharmaceutique, il est pertinent de recentrer l'analyse sur une seule d'entre elles afin d'en approfondir la compréhension. Le choix s'est porté sur le charbon actif, une substance d'origine naturelle dont les propriétés adsorbantes lui confèrent une large utilité dans les deux secteurs. Cette partie du travail vise ainsi à explorer en détail les caractéristiques, les fonctions et les applications concrètes du charbon actif.

II.6. Charbon actif :

Les premiers usages du charbon actif (ou activated carbon ») remontent aux Égyptiens qui utilisaient ses propriétés adsorbantes à des fins médicinales et pour purifier les huiles. Mais en fait, il s'agissait de charbon de bois, le charbon actif au sens moderne du terme n'étant apparu qu'à la fin du XIX^e siècle. L'invention du produit est attribuée à un Russe, Raphael Ostrejko, qui cherchait à améliorer les propriétés absorbantes des charbons dans la décoloration des sucres dans les années 1900.

II.6.1. Définition :

Le **charbon actif**, également connu sous le nom de charbon activé, est une forme de carbone qui a été traitée pour augmenter sa surface spécifique et sa capacité d'adsorption.

L'adsorption est le processus par lequel les molécules de gaz, de liquides ou de solides sont piégées à la surface d'un matériau solide.

La principale caractéristique du charbon actif est sa structure poreuse, qui lui donne une grande surface spécifique. Cette surface élevée permet d'adsorber une variété de substances chimiques, toxines, métaux lourds, gaz et impuretés. En fonction du matériau de base utilisé, type de bois (chêne, bouleau, hêtre, pin,...), écorce de noix de coco, bambou, les propriétés d'absorption et la tailles de pores plus ou moins larges permettront différents types de filtrage.

II.6.2. Les différentes formes du charbon actif :

II.6.2.1. Charbon actif en poudre (CAP) :

Le charbon actif en poudre ou CAP prend la forme de grains, 95-100 % de ces particules traverseront un tamis de maille donnée. Par exemple la norme ASTM D5158 classe les particules de diamètre inférieur ou égal à 0.177 mm comme CAP.²⁹



Figure 3:Charbon actif en poudre.

Tableau II.3 : les avantages et les inconvénients du charbon actif en poudre.

Avantages	Inconvénients
Le charbon actif en poudre est 2 à 3 fois moins cher que le charbon actif en granulé	Le charbon actif en poudre ne peut pas être régénéré quand il est mélangé avec des boues d'hydroxyde
Des quantités supplémentaires peuvent être rajoutées en cas de pointes de pollution accidentelles ou temporaires	Il est difficile d'enlever les dernières traces d'impuretés sans ajouter une quantité très importante de charbon actif en poudre
L'adsorption est rapide dans la mesure où une grande partie de la surface de contact est directement disponible	La détection des pointes de pollution est problématique et sa concentration applicable est limitée

II.6.2.2. Charbon actif granulé (CAG) :

Le CAG peut être soit en forme granulée soit extrudée il est représenté par des tailles telles que 8x20, 20x40, ou 8x30 pour des applications en phase liquide et par 4x6, 4x8 ou 4x10 pour des applications en phase vapeur. Par exemple, un charbon 20x40 est formé de particules traversant une maille standard américaine N° 20 (0.84 mm) mais retenues par une maille N° 40 (0.42 mm).²⁹

**Figure 4:** Charbon actif granulé.

Le **charbon actif granulé** est utilisé dans des différents types dans le système de traitement des eaux pour la réduction des oxydants chlorés résiduels et une très faible élimination de certains sous-produits de désinfection tels que les bromates et les chlorates, et aussi utilisé pour enlever la turbidité et pour dissoudre des composés organiques, l'odeur, les taches, les colorants.²⁹

Tableau II.4 : les Avantages et les Inconvénients du charbon actif en granulé.²⁹

Avantages	Inconvénients
Le choix du type de charbon actif est également déterminant sur le rendement de l'élimination	Une durée de vie limitée.
Il a une grande capacité d'adsorption pour les substances organiques en particulier les solvants.	Pré filtration : les carburants dissous et matières en particules peuvent rapidement encrasser le charbon, nécessitant un prétraitement dans la plupart des cas

Il retient un grand nombre de substances chimiques en même temps	Coût : le besoin de remplacer régulièrement le charbon épuisé rend le charbon actif granuleux plus cher que le stripping pour des concentrations élevées de contaminants
Il fonctionne bien dans un domaine large de température et d'humidité	Déchets dangereux : tout le charbon doit être finalement jeté, puisqu'il ne peut être régénéré qu'un certain nombre de fois, ou pas du tout dans le cas de l'adsorption de métaux ou de résidus d'explosifs. Selon les caractéristiques du charbon épuisé, il peut être jeté comme déchet dangereux.

II.6.2.3. Les fibres de charbon activé :

Une nouvelle forme de charbon actif consiste en une Fibre de Carbone Activé (FCA) d'origine naturelle ou synthétique sous forme de matériau carboné poreux.

Présentant de nombreux avantages par rapport aux charbons actifs en grains. Leur surface spécifique élevée associée à leur microporosité très développée, confèrent aux FCA une grande capacité à adsorber les molécules organiques. Elles sont capables de piéger un large spectre de polluants allant des composés organiques volatils aux substances toxiques non biodégradables (pesticides, détergents,...).

Elles peuvent s'intégrer dans des installations existantes tels que les systèmes de climatisation, les appareils d'air conditionné, les filtres à air d'habitacles automobiles, les filtres domestiques ou industriels.

II.6.3. Les propriétés charbon actifs :

II.6.3.1. Propriétés physiques :

II.6.3.1.1. Structure du charbon actif :

Un charbon actif est constitué d'un agencement désordonné de microcristaux de tailles variables (5 à 150 Å). Chaque microcristal est constitué par un empilement irrégulier de 5 à 20 feuillets distants de 3,6 Å. La présence d'hétéroatomes conduit suivant le mode de fabrication du charbon actif à la formation de groupements fonctionnels sur les arêtes des microcristaux.

II.6.3.1.2. La surface spécifique (aire massique) :

La surface développée par le charbon actif et qui tient compte de toutes les irrégularités existantes à l'échelle moléculaire, elle est rapportée à l'unité de masse de charbon et peut atteindre 2700 m²/g.

II.6.3.1.3. La porosité :

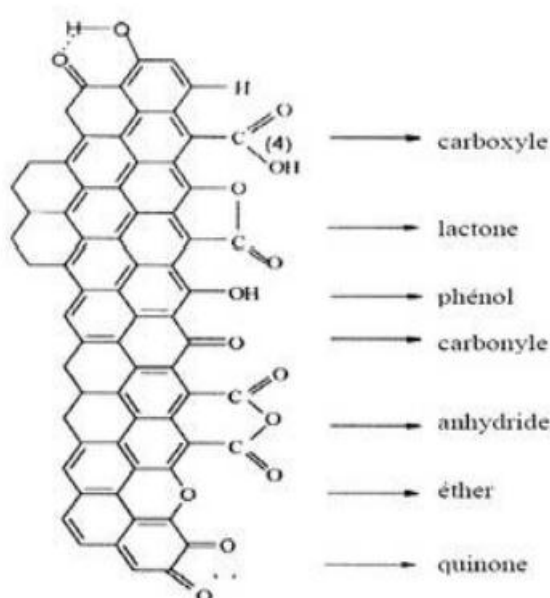
Représente la fraction du vide existant dans le charbon actif. Elle peut atteindre 80 % et dépend des dimensions des pores et de leurs distributions. Les pores sont généralement classés suivant leurs tailles en trois catégories comme l'indique le tableau et la figure ci-dessous.²⁹

Tableau II.5 : Classification de porosité.²⁹

Type de pores	Rayon (nm)	Surface spécifique (m ² /g)	Volume massique (ml/g)
Micropores	< 2	600–1500	0.2 – 0.6
Mésopores	2 – 50	20–70	0.02 – 0.1
Macropores	> 50	0.5–2	0.2 – 0.8

II.6.3.2. Propriétés chimiques :

Les groupements carboxyliques, anhydrides carboxyliques, phénoliques, carbonyles et lactones sont les plus couramment rencontrés. Ces groupements de surface sont à l'origine du caractère hydrophile du charbon actif et de son potentiel électrocinétique. Ils confèrent au charbon actif des propriétés acido-basiques.²⁹

**Figure 5:** les Groupements de surface du CA.²⁹**II.6.4. Domaines d'utilisation :**

En raison de ces différentes propriétés, le charbon actif est largement utilisé dans divers domaines :

- ✓ **Filtration de l'eau :** Le charbon actif est utilisé dans les filtres à eau pour éliminer les contaminants, les odeurs et les goûts indésirables.
- ✓ **Traitement des eaux usées :** Dans les installations de traitement des eaux usées, le charbon actif est utilisé pour éliminer les polluants organiques et certains produits chimiques toxiques.
- ✓ **Médicaments et empoisonnements :** Le charbon actif est parfois utilisé en cas d'empoisonnement ou de surdosage médicamenteux, car il peut adsorber certaines substances toxiques et les empêcher d'être absorbées par l'organisme.
- ✓ **Industrie chimique :** Il est utilisé pour purifier et décolorer des produits chimiques, ainsi que pour récupérer certains solvants.
- ✓ **Applications dans l'industrie agroalimentaire :** Le charbon actif est utilisé pour décolorer, désodoriser et purifier des produits alimentaires tels que le sucre, les huiles, les alcools, etc.

- ✓ **Masques de protection** : Dans certains masques de protection, du charbon actif est intégré pour aider à filtrer les particules et les odeurs.³⁰

II.6.5. Classification des charbons actifs :

Les charbons actifs peuvent être divisés en types suivants selon leur utilisation :

- Charbons actifs pour l'adsorption des gaz et vapeurs.
- Charbons actifs pour l'adsorption de la phase liquide.
- Les charbons actifs comme noyau de catalyseurs et d'absorbants chimiques.

La classification du charbon actif peut également être faite en fonction d'autres facteurs. Parmi eux, les distinctions suivantes peuvent être faites :

- Matière première du charbon actif : bois, charbon, coquille de noix de coco et ainsi de suite ;
- Descripteurs : catalyseurs clarifiants, gazeux, charbonneux aux qualités de sorbants chimiques ;
- Techniques d'activation : vapeur et méthode thermochimique ;
- Formes de présentation : charbon actif granulé (broyé), poudre, charbon actif moulé, charbon extrudé (granulés sous forme de cylindres) et tissu imprégné de charbon.³¹

II.6.6. La préparation du charbon actif :

II.6.6.1. La pyrolyse :

La pyrolyse est la décomposition thermique d'un matériau organique sous vide ou sous atmosphère inerte (on utilise l'azote généralement) à des températures allant de 400 à 1000°C; les hétéroatomes (oxygène et hydrogène) sont éliminés sous l'effet de la chaleur et le matériau devient plus riche en carbone. Les atomes de carbone se retrouvent dans les feuillets aromatiques possédant une certaine structure planaire. Ces feuillets s'arrangent ensuite de manière irrégulière laissant ainsi des interstices entre eux. Ces interstices donnent naissance à une porosité primaire du produit carbonisé. Les différents paramètres déterminants la qualité, les propriétés et le rendement du carbonisât sont :

- La vitesse du chauffage du four.
- La température finale de pyrolyse.
- Le temps de résidence dans le four.
- La nature du matériau de départ.

Le produit de la carbonisation ne possède en général qu'une porosité peu développée et ne peut être employé comme adsorbant sans un traitement supplémentaire d'activation entraînant une augmentation sensible de sa surface spécifique.²⁹

II.6.6.2. L'activation :

L'activation consiste à développer la structure poreuse en éliminant les goudrons obstruant les pores et en créant des fonctions de surface (généralement oxydées) qui provoquent des interactions entre le solide et les molécules adsorbées. Cela peut être physique ou chimique.

II.6.6.2.1. Activation physique :

Permet de développer des pores existants et d'en créer d'autres. Elle est réalisée entre 600 °C et 1000 °C en présence d'un gaz faiblement oxydant (air), de vapeur d'eau, de CO₂ ou d'un mélange de ces gaz.

II.6.6.2.2. Activation chimique :

Le traitement chimique est plutôt utilisé avec le bois. Il consiste à imprégner le produit de départ d'une solution concentrée d'agent hautement oxydant ou desséchant (acide phosphorique, chlorure de zinc, etc.), le matériau subit ensuite une pyrolyse entre 400 °C et 800 °C en l'absence d'air, puis est lavé et séché. Le charbon actif est ainsi obtenu en une seule étape. C'est le degré d'imprégnation du matériau oxydant qui définit la structure poreuse finale.

Après activation, le charbon actif acquiert une structure poreuse poly-dispersée : les pores ont des formes et des tailles différentes, la distribution poreuse dépend de la nature de la matière première, mais aussi des conditions d'activation, les propriétés physicochimiques du carbone peuvent donc, varient pour le même précurseur.²⁹

II.7. Substrats :

Il est possible d'obtenir du charbon de bois pour la production de charbons actifs à partir des types de matières premières suivants :

- Bois de chauffage et déchets d'ébénisterie de diverses essences : bouleau, chêne, hêtre, charme...
- Les coques de diverses noix : noix, noix de coco, amande, noisette, etc.
- Noyaux de fruits : olives, abricot, pêche, mangue, avocat et autres fruits à noyau.
- Autres déchets de plantes ligneuses.³¹

II.8. Élimination ou réactivation ?

La durabilité d'un produit est essentiellement déterminée par sa durée de vie par rapport aux ressources utilisées lors de sa fabrication. Dans certains cas, l'élimination du charbon actif utilisé est inévitable, notamment en cas de charge importante de métaux lourds, de soufre ou d'halogènes. Dans ce cas, il convient d'examiner soigneusement la manière dont les déchets doivent être traités. Dans la plupart des cas d'application, il est toutefois possible de réactiver le charbon actif sans problème après son utilisation. Si ce sont principalement des hydrocarbures légèrement à moyennement volatils qui sont adsorbés à partir de la phase gazeuse, une régénération presque complète est possible. Les charbons actifs issus du traitement de l'eau peuvent également être réactivés tant qu'ils respectent les valeurs limites nationales, comme par exemple le décret allemand sur l'eau potable. Cela permet de doubler au moins la durée de vie du charbon actif, voire de la multiplier.³²

II.9. Conclusion

À l'issue de ce chapitre, il ressort que les industries cosmétique, pharmaceutique et parapharmaceutique, bien que distinctes dans leurs finalités, partagent de nombreuses similitudes en matière d'organisation, d'acteurs et de matières premières utilisées. Le charbon actif s'est révélé être un exemple significatif de cette convergence. Grâce à ses propriétés d'adsorption, sa diversité de formes et ses multiples applications, il occupe une place importante dans ces trois secteurs. Sa préparation, bien que nécessitant un certain savoir-faire, conditionne directement son efficacité. Ces constats mettent en lumière l'intérêt croissant pour cette substance, aussi bien dans les produits de soin que dans les dispositifs thérapeutiques, ce qui en fait un sujet d'étude pertinent dans une perspective de valorisation durable des ressources.

Références bibliographiques :

- (1) Larousse, É. *Définitions : déchet, déchets - Dictionnaire de français Larousse*. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/d%C3%A9chet/22142> (accessed 2025-05-03).
- (2) *Définitions de la terminologie réglementaire*. Agence Nationale des Déchets. <https://and.dz/base-des-connaissances/definitions/> (accessed 2025-05-03).
- (3) *Réglementation générale déchets*. https://www.ordeco.org/reglementation-generale?fbclid=IwY2xjawKEu5lleHRuA2FlbQIxMABicmlkETFsWVFqdzk5ZHdsWjZIR1pyAR5Emgb041LTv5WV6OG6Hjy59ViaN-qbWrPPYO62pXIF7HshL-QzF1PRw2WvAw_aem_XVBDp5ToFBnrtRW1sI2K_A (accessed 2025-05-04).
- (4) *Définition de Déchet*. Actu-Environnement. https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dechet.php4 (accessed 2025-05-04).
- (5) Bertolini, G. Qu'est-ce qu'un déchet ? Le droit européen rejette l'acception économique. *Environ. Ingénierie Dév.* **1998**, N°12-4ème Trimestre 1998, 8201. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.906>.
- (6) Guide Dechet. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.dgdr.cnrs.fr/sst/cnps/guides/doc/dechets/guidedechets.pdf&ved=2ahUKEwj1z7zz64mNAxUFT6QEHLyOn8QFnoECCAQAQ&usq=AOvVaw3cmTRJnuprfwPnT_ffihAb (accessed 2025-05-04).
- (7) Dr. BAZRI K.E.D. Cour Univ Constantine1. <https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/becol/2022/Cours%20Pollution%20par%20les%20d%C3%A9chets.%20BAZRI.pdf> (accessed 2025-05-04).
- (8) Chapitre01_univ_msila. https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/287996/mod_resource/content/1/chapitre01.pdf (accessed 2025-05-04).
- (9) Journal Officiel. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.joradp.dz/FTP/Jo-Francais/2001/F2001077.pdf&ved=2ahUKEwj6zufd8omNAxUeVKQEHZ_ONuQQFnoECBIQBg&usq=AOvVaw1oT66NTatYjvQDnKewVa5m (accessed 2025-05-04).
- (10) Auvergne-Rhône-Alpes, D. *Classification et traçabilité des déchets*. DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. <https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/classification-et-tracabilite-des-dechets-a13138.html> (accessed 2025-05-03).
- (11) *Qu'est-ce que le Catalogue Européen des Déchets (CED) et à quoi sert-il ? – ScrapAd*. <https://scrapad.com/fr/blog/quest-ce-que-le-catalogue-europeen-des-dechets-et-a-quoi-sert-il/> (accessed 2025-05-03).
- (12) Liste de codification des déchets (Annexe II de l'article R. 541-8 du CE).
- (13) *Gestion des déchets : principes généraux | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique*. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/gestion-dechets-principes-generaux> (accessed 2025-05-03).
- (14) *Exposé gestion et valorisation des déchets*. SlideShare. <https://fr.slideshare.net/slideshow/expos-gestion-et-valorisation-des-dchets/87637804> (accessed 2025-05-04).
- (15) CLIC1000, L. *Gestion et caractérisation des déchets urbains solides*. Documents pour tous. <https://www.clicours.com/gestion-et-caracterisation-des-dechets-urbains-solides/> (accessed 2025-05-04).

- (16) *Cadre institutionnel et réglementaire*. Agence Nationale des Déchets.
<https://and.dz/presentation/cadre-institutionnel-et-reglementaire/> (accessed 2025-05-04).
- (17) *Loi n° 01-19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets*. | FAOLEX.
https://www.fao.org/faolex/results/details/fr/c/LEX-FAOC043228/?fbclid=IwY2xjawKDIQdleHRuA2FlbQIxMABicmlkETFDcXc3dWFxejViaEl1NHZNAR63FzXDb8sLqHuOE2rrIOlKL-QSdowF67UEnyvB0bnmd3gFUbOIIf5rF_UbHuQ_aem_9_z-8LTLVXkyWLtAZGhkXA (accessed 2025-05-04).
- (18) *sabrine. Adoption du texte de loi relatif à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets*. وزارة البيئة وجودة الحياة. <https://www.me.gov.dz/fr/adoption-du-texte-de-loi-relatif-a-la-gestion-au-contrôle-et-a-lélimination-des-dechets/> (accessed 2025-05-04).
- (19) *Les conséquences de la production de déchets sur l'écosystème*. idverde.
<https://idverde.fr/blog/les-consequences-de-la-production-de-dechets-sur-lecosysteme/> (accessed 2025-05-03).
- (20) *Comment les déchets affectent-ils l'environnement ?* | Contelogic.
<https://contelogic.com/fr/comment-les-dechets-affectent-ils-lenvironnement/> (accessed 2025-05-03).
- (21) *DGB | L'importance et l'impact de la gestion des déchets*.
https://www.green.earth/fr/waste-management?fbclid=IwY2xjawKDLW5leHRuA2FlbQIxMABicmlkETFWZHJCVDJQYIBFRHZPSjhaAR7agS_5eADhh05IcrA9JoRVueU0rY0sHDK7QmjQFBwhitQc_8LZYf0GWcy1jQ_aem_weIHVtkX6ufcCzV_a39UPQ (accessed 2025-05-03).
- (22) *Pense-Lheritier, A.-M. Innovation et éco-conception pour les produits de l'industrie cosmétique. *Marché Organ.* 2013, 17 (1), 137–147.*
<https://doi.org/10.3917/maorg.017.0137>.
- (23) *Industrie cosmétique : définition, challenges et conseil*. Sneci.
<https://www.sneci.com/nos-secteurs-intervention/cosmetique/> (accessed 2025-05-14).
- (24) *Industrie pharmaceutique : définition, challenges et conseil*. Sneci.
<https://www.sneci.com/nos-secteurs-intervention/sante-et-pharmaceutique/> (accessed 2025-05-16).
- (25) *Chapitre 79 - L'industrie pharmaceutique*. <https://ilocis.org/fr/documents/ilo079.htm> (accessed 2025-05-16).
- (26) *Hamdouch, A.; Depret, M.-H. Coalitions industrielles, réseaux de firmes et dynamiques de concurrence-coopération dans les secteurs en cours de globalisation : le cas de l'industrie pharmaceutique. *Cah. Maison Sci. Econ.* 2000.*
- (27) *Découvrez le secteur de la parapharmacie - Dossier complet*. https://www.go-sidely.com/post/secteur-parapharmacie?fbclid=IwY2xjawKVvV1leHRuA2FlbQIxMABicmlkETFGMmZZd0RpUGRSekp2TVZ6AR6E_EkXHqO5i06xMHm3XwLNWKP29yc-hCUU2h0N1QPS0LdGcgk_lNSssZh19w_aem_cVJb1HEL7NPR2-ozw_IN_w (accessed 2025-05-17).
- (28) *Fabrication et Contrôle de Qualité d'un Produit Parapharmaceutique : « Compresse Stérile »*. <http://dspace.univ-bouira.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/10469/1/Fabrication%20et%20contr%C3%B4le%20de%20qualit%C3%A9%20d%E2%80%99un%20produit%20pharmaceutique%20compresse%20sterile.pdf> (accessed 2025-05-17).
- (29) *Préparation et Caractérisation d'un Charbon Actif à Partir Des Tiges Des Roseaux Par Voie Chimique, 2020*. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29291/1/MIMOIRE%20Final.pdf> (accessed 2025-05-17).

- (30) *Qu'est-ce que du charbon actif?* https://www.yokodesign.fr/fr/journal/qu-est-ce-que-du-charbon-actif-.html?fbclid=IwY2xjawKV8AtleHRuA2FlbQIxMABicmlkETE3VGdQeUp3ZzRkeG50eWNwAR5fgc_Nd317FS0OcXmCaWGIG5jDaDLcjcyC1LjGOCD03qLbBzvLAfFUvJcpQ_aem_H4eNmJsITh4zIMWOjwQLIA (accessed 2025-05-17).
- (31) *Matières premières pour la production et la classification des charbons actifs* ✓. Greenpower. <https://greenpower.equipment.fr/articles/matieres-premieres-pour-la-production-et-la-classification-des-charbons-actifs/> (accessed 2025-05-17).
- (32) *Durabilité et charbons actifs - fabrication, utilisation et élimination - CarboTech Gruppe*. <https://www.carbotech.de/fr/nouvelles-fr/durabilite-et-charbons-actifs-fabrication-utilisation-et-elimination/> (accessed 2025-05-18).
- (33) Abdelmalek, khaoula; Boufarou, hadjer. Préparation et caractérisation d'un charbon de marc de café, Larbi TEBESSI-Tébessa, 2020. <http://oldspace.univ-tebessa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1381> (accessed 2025-06-14).
- (34) BRIKCI NIGASSA, H. Etude physicochimique et effets biologiques de « la poudre de noyau de dattes » chez le rat Wistar, ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN, 2020. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/16547/1/BrikciNigassa.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (35) *Les bienfaits et utilisations des noyaux de dattes - L'écho Tunisien*. <https://lecho.tunisien.com/les-bienfaits-et-utilisations-des-noyaux-de-dattes/> (accessed 2025-06-14).
- (36) *Study of chemical composition of date stones for use in animal feed*. <http://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd21/5/boud21069.htm> (accessed 2025-06-14).
- (37) Boussena, Z. Etude de la composition chimique et microbiologique de noyaux de variétés de dattes Algériennes en vue de la valorisation dans le domaine alimentaire. Thesis, univ.blida1, 2012. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/6781> (accessed 2025-06-14).
- (38) Boussena, Z.; Khali, M. Extraction et composition chimique d'huile de noyaux de dattes algériennes. [Extraction and chemical composition of algerian date seeds oil]. *Nutr. Santé* **2016**, 5 (2), 100–106.
- (39) Benakli, L. Valeur nutritive de la poudre de noyaux de dattes, Université Mouloud Mammeri, 2021. <https://dspace.ummto.dz/handle/ummto/18906> (accessed 2025-06-14).
- (40) *Analyse de matériaux par DRX (Diffraction des Rayons X)*. FILAB. <https://filab.fr/nos-moyens-techniques/analyse-et-caracterisation-des-materiaux-par-diffraction-des-rayons-x-drx-en-laboratoire/filab-caracterise-vos-mineraux-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (41) *Analyse DRX en laboratoire - YesWeLab - Blog*. <https://blog.yeswelab.fr/plantes-cosmetiques/analyse-drx-laboratoire/> (accessed 2025-06-14).
- (42) *Décrypter la Cristallinité : Analyse des Poudres par DRX en Laboratoire*. <https://bplc.fr/laboratoire-dessais/services-et-prestations-des-laboratoires-dessais/prestation-de-laboratoire-de-chimie-analytique-et-organique/analyses-en-laboratoire-de-caracterisation-et-cristallinite-des-poudres-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (43) Fiche-N°6-Appareil-BET.Pdf. <https://www.fs-umi.ac.ma/wp-content/uploads/2020/10/Fiche-N%C2%B06-Appareil-BET.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (44) *Analyse de porosité BET - Département de chimie - Université de Sherbrooke*. <https://www.usherbrooke.ca/chimie/services/thermomecanique/bet> (accessed 2025-06-14).

CHAPITRE 3 :

Matériels et méthodes

III. Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Dans un contexte de valorisation des déchets organiques et de développement de solutions durables, la production de charbon actif à partir de biomasses locales représente une alternative prometteuse, à la fois économique et respectueuse de l'environnement. Ce chapitre s'intéresse à deux résidus agroalimentaires abondants en Algérie : les noyaux de dattes et le marc de café, choisis comme matières premières pour l'élaboration du charbon actif. Après avoir présenté leurs caractéristiques physico-chimiques et leurs principales utilisations, nous détaillerons les différentes étapes du protocole de préparation du charbon actif, en tenant compte des paramètres influençant sa qualité. Enfin, nous aborderons les techniques de caractérisation (MEB, DRX, BET, FTIR, AGT), indispensables pour évaluer les propriétés structurales et texturales du matériau obtenu.

III.2. Choix de la biomasse :

Le choix des biomasses s'est porté sur deux déchets organiques abondants et non valorisés dans de nombreuses régions : Le marc de café et Les noyaux de dattes.

III.2.1. Le marc du café :

III.2.1.1. Définition :

C'est le reste du café après infusion dans de l'eau, généralement chaude. Il est composé de beaucoup d'éléments d'intérêts dont la valorisation permet l'obtention de différents produits.³³



Figure 6: Marc de café.³³

III.2.1.2. Propriétés du marc du café :

Le marc de café possède plusieurs propriétés, soit physiques et chimiques. Celles-ci sont exposées ici :

➤ Propriétés physiques du marc de café

Le marc de café possède un haut taux d'humidité. Plus l'humidité est grande plus la croissance microbienne est favorisée, donc des stratégies de conservations optimales sont nécessaire afin de récupérer une matière de qualité.

En ce qui concerne la morphologie des grains de marc de café, la figure 7 illustre un grain de marc de café issu des commerces et prise par microscopie électronique à balayage.³³

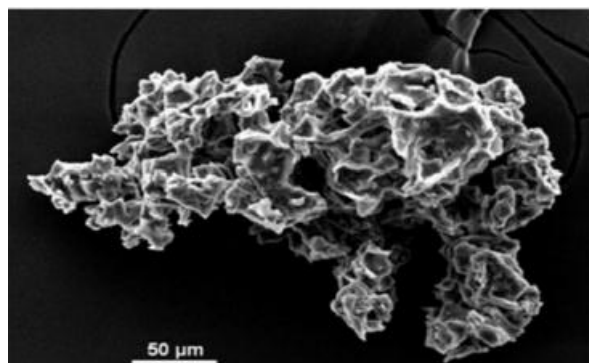


Figure 7: Grain de marc de café commercial par microscopie électronique à balayage.³³

➤ Propriétés chimiques du marc de café

Le carbone est l'élément majoritaire du marc de café. Le tableau III.6 présente la composition élémentaire du marc de café.³³

Tableau III.6 : Composition élémentaire du marc de café.³³

Eléments	Quantités
Carbone(C)	49,7%
Hydrogène(H)	s.d.
Azote(N)	2,3%
Oxygène(O)	s.d

Tableau III.7 : Les principaux composés du marc de café.³³

Eléments	Quantités
Glucides	45,3%
Lipides	9,3-16,2%
Protéines	14%
Minéraux	6800 Kg de matière sèche

III.2.1.3. Utilisation de marc de café

De multiples voies de valorisation et d'utilisations sont possibles avec le marc de café. Parmi celles-ci se retrouvent les productions d'éthanol, de biodiesel, de combustibles pour les fours industriels et de granules de combustion pour les fours résidentiels. Le marc de café peut être utilisé dans l'industrie alimentaire, dans la production de biomatériaux, dans la production de charbon actif, dans le traitement des eaux usées des industries et de l'eau potable, etc. Pour toutes les voies de valorisation qui sont discutées, l'utilisation du marc de café arabica ou robusta est possible, aucune distinction n'a été faite par les études.³³

III.2.1.4. Protocole de préparation du charbon actif à partir du marc de café :

➤ Produits et matériels utilisés :

Tableau III.8 : produits et matériels utilisés.

Matériels	Produits
<ul style="list-style-type: none"> • Etuve • Four • Appareil d'agitation • Des creusets • Papier filtre 	<ul style="list-style-type: none"> • Eau distillée • Acide phosphorique $H_3 PO_4$ • Marc du café

<ul style="list-style-type: none"> • Tamis • Appareil PH mètre • Balance • Becher • Appareil MEB, FTIR, DRX, ATG 	
---	--

➤ **Préparation de la matière première**

- **Collecte du marc de café** : Récupérer le marc de café frais de nos maisons.
- **Lavage** : Laver abondamment le marc de café avec de l'eau distillée pour éliminer les impuretés et les substances solubles.
- **Séchage** : Sécher le marc lavé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures pour éliminer l'humidité.
- **Broyage et tamisage** : Broyer le marc sec et le tamiser pour obtenir une granulométrie uniforme, généralement inférieure à 0,5 mm.

➤ **Première pyrolyse (carbonisation, activation thermique)** : Une première pyrolyse a été effectuée à une température de 700 °C pendant 1 heure, sous atmosphère inerte (absence d'oxygène) afin d'éviter toute oxydation. Cette étape permet la décomposition thermique de la biomasse, entraînant la libération des composés volatils et la formation d'une structure carbonée poreuse. Sous l'effet de la chaleur, la biomasse se contracte, ce qui favorise la formation de pores dans le matériau obtenu.

➤ **Activation chimique** : L'échantillon carbonisé a été soumis à une activation chimique à l'aide d'une solution d'acide phosphorique ($H_3 PO_4$). Pour cela, 200 mL d'une solution diluée à 40 % ont été préparés à partir d'un acide phosphorique concentré à 85 %. L'activation a été réalisée par imprégnation de 2,11 g de charbon préalablement obtenu dans cette solution pendant 12 heures à température ambiante. Après l'activation, la masse du solide a été réduite à 2 g, ce qui indique une légère perte de matière.

➤ **Rinçage et séchage** : Après activation, le matériau a été abondamment rincé à l'eau distillée afin d'éliminer les résidus d'acide et les produits de décomposition. Le solide a ensuite été séché à 105 °C jusqu'à stabilisation de sa masse.

➤ **Deuxième pyrolyse** : Une seconde pyrolyse, a été réalisée à 350 °C pendant 1 heure. Cette étape vise à réorganiser la structure du charbon actif après l'attaque chimique de l'acide phosphorique, notamment pour réouvrir les pores qui auraient pu être obstrués. À cette étape, la masse du matériau est passée de 1,82 g à 1,48 g, traduisant une nouvelle perte de matière liée à la volatilisation des composés instables.

➤ **Caractérisation** : Le charbon actif obtenu a été caractérisé par plusieurs techniques afin d'évaluer ses propriétés physico-chimiques. L'analyse BET a permis de déterminer une surface spécifique significative, confirmant le développement de la porosité après activation. La spectroscopie FTIR a révélé la présence de groupes fonctionnels tels que les hydroxyles, carbonyles et phosphates, favorables à l'adsorption. La diffraction des rayons X (DRX) a montré une structure majoritairement amorphe, typique des charbons issus de biomasse. Enfin, l'observation au microscope électronique à balayage (MEB) a mis en évidence une surface poreuse, confirmant l'efficacité du traitement chimique et thermique sur la structure du matériau.

III.3. Les noyaux des dattes :

III.3.1. Définition :

Le noyau de datte est la graine dure contenue à l'intérieur du fruit du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.).

Il représente environ 7 à 30 % du poids total de la datte selon la variété et la maturité du fruit.

Sa forme est allongée, avec un endocarpe dur et lisse ou parfois pourvu de protubérances latérales, ainsi qu'un sillon ventral caractéristique.

L'intérieur du noyau contient un albumen dur et corné, avec un embryon relativement petit (2 à 3 mm).³⁴



Figure 8: Noyaux de dattes.³⁵

III.3.2. Composition chimique générale :

Les noyaux de dattes sont principalement composés de matière sèche élevée, généralement entre 85 % et 93 %, ce qui leur confère une consistance très dure et une bonne conservation.³⁶

- **Glucides** : Ils contiennent une forte proportion de glucides (environ 66 % en moyenne), principalement sous forme de cellulose brute (environ 15 %) et autres fibres alimentaires.³⁷
- **Matières grasses** : La teneur en lipides varie entre 5 % et 12 %, avec une composition riche en acides gras saturés et insaturés, notamment l'acide laurique (7 à 23 %), oléique, myristique, palmitique et linoléique.³⁸
- **Protéines** : Les noyaux contiennent des protéines avec des teneurs variables selon la variété, allant de 2 à plus de 10 %, comprenant de nombreux acides aminés essentiels tels que lysine, leucine, méthionine, thréonine, valine, phénylalanine et un acide glutamique dominant.³⁷
- **Minéraux** : Ils renferment divers minéraux comme le sodium, potassium, calcium, magnésium, phosphore, fer, zinc, cuivre, cobalt, manganèse, et traces d'aluminium ou plomb, avec une teneur totale en minéraux comprise entre 1,2 % et 3,2 %.³⁷
- **Fibres** : Les fibres alimentaires sont abondantes, notamment la cellulose, ce qui limite parfois leur digestibilité mais confère un intérêt fonctionnel.³⁶
- **Cendres** : La teneur en cendres est faible, généralement entre 0,9 % et 1,2 %.³⁴

III.3.3. Propriétés nutritives et fonctionnelles :

Les noyaux de dattes sont une source intéressante de nutriments pour l'alimentation animale et humaine, notamment en protéines, lipides et fibres.

Ils contiennent des composés bioactifs tels que des polyphénols et des antioxydants, ce qui leur confère des propriétés protectrices contre le stress oxydatif.³⁹

Leur richesse en acides gras insaturés, notamment oléique, est bénéfique pour la santé cardiovasculaire.³⁸

III.3.4. Utilisations potentielles :

En agroalimentaire, les noyaux peuvent être valorisés sous forme de farine pour la panification ou comme complément alimentaire.³⁷

Leur forte teneur en carbone et lignocellulose en fait une excellente matière première pour la production de charbon actif, utilisé dans la purification de l'eau et des gaz.

Ils peuvent aussi être utilisés comme source d'huile végétale, matière première pour la fabrication de biocarburants, ou encore en alimentation animale.³⁶

III.3.5. Protocole de préparation du charbon actif à partir des noyaux de datte :

➤ Produits et matériels utilisés :

Tableau III.9 : produits et matériels utilisés.

Matériels	Produits
<ul style="list-style-type: none"> • Etuve • Four • Appareil d'agitation • Des creusets • Papier filtre • Tamis • Appareil PH mètre • Balance • Becher • Broyeur • Appareil MEB, FTIR, DRX, ATG 	<ul style="list-style-type: none"> • Eau distillée • Acide chloridrique HCL • Acide phosphorique $H_3 PO_4$ • Noyaux des dattes

➤ Préparation de la matière première :

- **Lavage des noyaux broyés** : Les noyaux broyés ont été lavés soigneusement afin d'éliminer les impuretés adhérentes issues du charbon brut. Cette étape est cruciale pour améliorer la qualité du matériau de départ.
- **Séchage des noyaux lavés** : Après le lavage, les noyaux ont été placés dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures, afin d'éliminer toute l'humidité résiduelle et d'obtenir un matériau parfaitement sec pour les étapes suivantes du traitement.

➤ Activation chimique

Une activation chimique a été réalisée en ajoutant une solution d'acide chlorhydrique (HCl) concentré à 37 % aux échantillons de charbon. Le contact entre le charbon et l'acide a été maintenu pendant 24 heures, afin de favoriser l'imprégnation.

➤ Rinçage et séchage

Après cette période, le charbon a été lavé à l'eau distillée chauffée à 70 °C, jusqu'à l'obtention d'un pH neutre ($pH = 7 \pm 0,5$), mesuré à l'aide d'un pH-mètre (type Inolab pH 3710). Le charbon activé a ensuite été séché dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures.

➤ Première pyrolyse (carbonisation, activation thermique)

Une première pyrolyse a été effectuée à une température de 700 °C pendant 1 heure, sous atmosphère inerte (absence d'oxygène) afin d'éviter toute oxydation. Cette étape permet la décomposition thermique de la biomasse, entraînant la libération des composés volatils et la formation d'une

structure carbonée poreuse. Sous l'effet de la chaleur, la biomasse se contracte, ce qui favorise la formation de pores dans le matériau obtenu.

- **Activation chimique :** L'échantillon carbonisé a été soumis à une autre activation chimique à l'aide d'une solution d'acide phosphorique ($H_3 PO_4$). Pour cela, 100 ml d'une solution diluée à 40 % ont été préparés à partir d'un acide phosphorique concentré à 85 %. L'activation a été réalisée par imprégnation de 2,37 g de charbon préalablement obtenu dans cette solution pendant 12 heures à température ambiante. Après l'activation, la masse du solide a été réduite à 2,224 g, ce qui indique une légère perte de matière.
- **Deuxième pyrolyse :** Une seconde pyrolyse, a été réalisée à 350 °C pendant 1 heure. Cette étape vise à réorganiser la structure du charbon actif après l'attaque chimique de l'acide phosphorique, notamment pour réouvrir les pores qui auraient pu être obstrués. À cette étape, la masse du matériau est passée de 1,38 g à 1,37 g, traduisant une faible perte de matière liée à la volatilisation des composés instables.
- **Caractérisation :** Le charbon actif obtenu a été caractérisé par plusieurs techniques afin d'évaluer ses propriétés physico-chimiques. L'analyse BET a permis de déterminer une surface spécifique significative, confirmant le développement de la porosité après activation. La spectroscopie FTIR a révélé la présence de groupes fonctionnels tels que les hydroxyles, carbonyles et phosphates, favorables à l'adsorption. La diffraction des rayons X (DRX) a montré une structure majoritairement amorphe, typique des charbons issus de biomasse. Enfin, l'observation au microscope électronique à balayage (MEB) a mis en évidence une surface poreuse, confirmant l'efficacité du traitement chimique et thermique sur la structure du matériau.

III.4. Méthodes de caractérisation du charbons actifs préparé :

III.4.1. Analyse par MEB :

La microscopie électronique à balayage MEB (ou Scanning Electron Microscopy, SEM) est une technique puissante d'observation des échantillons et en particulier de la topographie des surfaces. Elle est fondée principalement sur la détection des électrons secondaires émergents de la surface sous l'impact d'un très fin faisceau d'électrons primaires qui balaye la surface d'un échantillon et permet d'obtenir des images avec un pouvoir séparateur souvent inférieur à 5 nm, et une grande profondeur de champ.⁴⁰

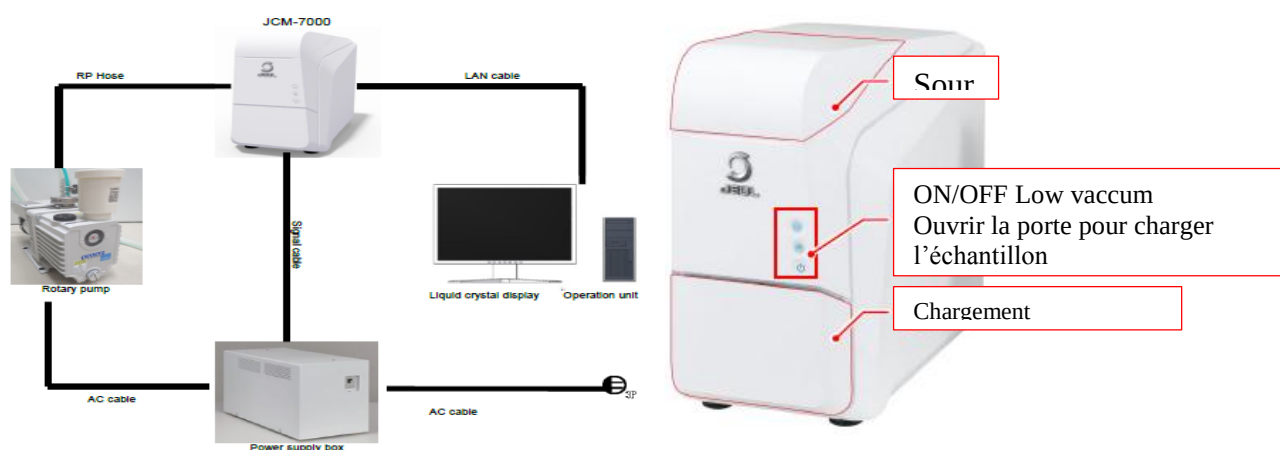


Figure 9:Appareil MEB.⁴⁰

III.4.1.1. Principe

Le MEB est un microscope électronique à balayage. Un faisceau d'électrons primaires est généré par un filament de tungstène (la source). Figure 1 représente le schéma de principe du MEB.

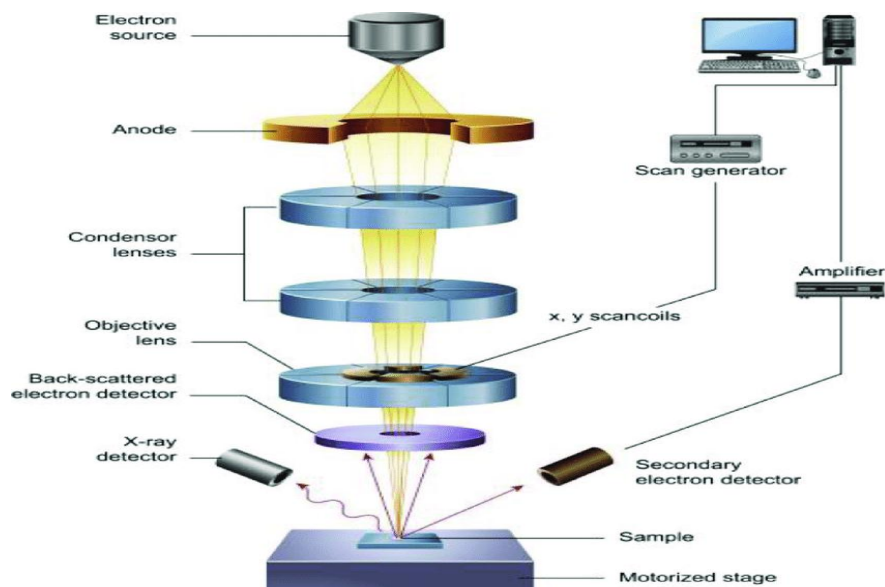


Figure 10 : Schéma du principe du MEB.

III.4.2. Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) :

III.4.2.1. Appareillage

Nous avons utilisé un spectromètre FTIR de type Agilent Cary, série 680 (figure 10). Sa gamme spectrale s'étend de 8000 à 400 cm^{-1} et la résolution maximale est de 0,1 cm^{-1} . Il est connecté aux deux extrémités du réacteur, avec d'une part le spectromètre et d'autre part le détecteur MCT refroidi à l'azote liquide. Le spectromètre est constitué d'une source infrarouge et d'un interféromètre. Pour minimiser l'influence de l'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2) sur les spectres FTIR, le spectromètre est purgé en continu par de l'air comprimé, sec et sans CO_2 , fourni par un générateur autonome de gaz de marque Parker Balston 74-5041. Le réacteur étant sous un vide primaire, des hublots en bromure de potassium (KBr) sont montés aux deux extrémités du réacteur. Ces hublots permettent le passage du faisceau infrarouge dans la gamme de longueurs étudiée.³⁷



Figure 10: Spectromètre et microscope FTIR Agilent Cary série 680.³⁷

III.4.2.2. L'objectif :

L'objectif de cette technique d'analyse est d'étudier les réactions chimiques entre la post-décharge et le précurseur organométallique (APTES) c'est - à - dire d'identifier les molécules qui apparaissent et / ou qui disparaissent lors de la décomposition du précurseur et de suivre leurs évolutions en fonction des paramètres opératoires (pression, puissance, débit).

III.4.2.3. Principe :

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par l'échantillon à analyser. Cet échantillon peut être à l'état gazeux, solide ou liquide. Elle permet via l'absorption des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, de déterminer la présence de certaines fonctions chimiques présentes dans la matière. Le principe du FTIR repose sur l'absorption du rayonnement infrarouge lorsque la longueur d'onde (l'énergie) du faisceau est égale à l'énergie de vibration de la molécule. Le domaine infrarouge entre 4000 cm et 400 cm (2.5-25 μm) correspond au domaine d'énergie de vibration de la plupart des molécules (infrarouge moyen). Cependant, certaines molécules ne donnent pas lieu à une absorption infrarouge, c'est le cas par exemple des molécules diatomiques homonucléaires (N_2 , O_2 , etc.) car leur moment dipolaire est nul. Il existe deux principaux types de vibrations : les élongations (stretching) le long de l'axe de la liaison, et les déformations (bending) occasionnant une modification de l'angle entre deux liaisons adjacentes, dans le plan ou hors du plan. Ces élongations et déformations peuvent être symétriques ou asymétriques. Elles sont illustrées figure III.12 en prenant pour exemple la liaison C - H.³⁷

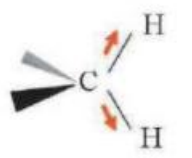
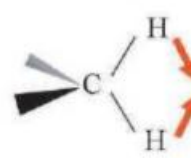
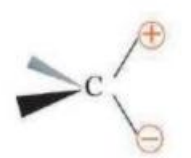
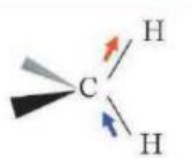
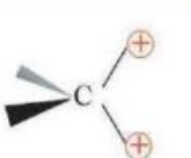
	Elongations	Déformations angulaires	
		dans le plan	hors du plan
Symétrique	 Elongation symétrique	 Cisaillement (scissoring)	 Torsion (twisting)
Asymétrique	 Elongation asymétrique	 Balancement (rocking)	 Hochement (wagging)

Figure 11: modes vibrationnels infrarouge d'une liaison CH.³⁷

III.4.3. Analyse par diffraction des rayons X (DRX) :

La Diffraction des Rayons X (DRX ou XRD) est une technique utilisée en laboratoire pour étudier la structure des matériaux, qui permet d'étudier les différentes phases de matières et matériaux cristallins. Cette méthode consiste à diffuser des rayons X sur le matériau et à mesurer les angles de diffraction.⁴⁰

Elle permet d'obtenir des informations quantitatives sur l'arrangement des éléments d'un matériau, ainsi que des informations qualitatives pour identifier les composés cristallins et leurs formes, en mesurant la diffraction de rayons X sur ces derniers. Avoir des informations précises sur la structure cristalline d'un matériau est essentielle pour comprendre ses propriétés physiques et chimiques.⁴⁰



Figure 12 : Appareil d'analyse DRX.⁴⁰

III.4.3.1. Principe :

Le principe de la DRX repose sur l'interaction des rayons X avec les plans atomiques d'un matériau cristallin. Les rayons X, lorsqu'ils traversent un échantillon, sont déviés ou « diffractés » par les atomes présents dans la structure du cristal. Le phénomène de diffraction est causé par la différence de longueur d'onde entre les rayons X et les distances interatomiques dans le matériau. La DRX repose sur la loi de Bragg, qui décrit comment les angles de diffraction peuvent être utilisés pour calculer l'espacement entre les plans atomiques. Cette équation est la clé pour analyser la structure interne des cristaux, car elle relie directement l'angle de diffraction et la longueur d'onde des rayons X à la distance interplanétaire d'un cristal donné.⁴¹

Le processus de diffraction des rayons X se déroule généralement en trois étapes principales :

1. **Emission de rayons X** : Les rayons X sont dirigés vers l'échantillon cristallisé.
2. **Diffraction** : Les rayons interagissent avec les atomes du cristal et sont diffractés selon des angles spécifiques.
3. **Collecte des données** : Un détecteur capte les rayons diffractés et les informations sont transformées en diffractogramme, un graphique qui représente les angles et les intensités des rayons diffractés.

Le diffractogramme obtenu est ensuite analysé pour déterminer les propriétés cristallographiques du matériau. Chaque pic sur le graphique correspond à une orientation spécifique des plans atomiques dans le cristal, et la position des pics révèle la structure cristalline.⁴¹

III.4.3.2. Objectif :

L'objectif principal de l'analyse **DRX** est de déterminer la structure cristalline des matériaux en poudre. Cette technique débloquent des informations clés sur la composition chimique, la symétrie cristalline et les différentes phases des matériaux. Elle est adaptée à l'étude des matériaux poly-cristallins afin de mieux comprendre leur structure et leur comportement, tant dans la recherche scientifique que dans l'industrie.⁴²

III.4.4. Analyse par Brunauer–Emmett–Teller (BET) :

C'est une méthode d'analyse, utilisée pour la caractérisation de la texture des poudres. Elle permet de déterminer leurs surfaces spécifiques, leurs porosités et les tailles de leurs pores.⁴³



Figure 13: Appareil d'analyse BET.⁴⁴

III.4.4.1. Principe :

Elle est basée sur la mesure de la quantité d'azote gaz adsorbé en fonction de sa pression relative à la température de l'azote liquide ($T = -77K$) et sous une pression atmosphérique normale. Elle met en jeu l'adsorption physique en multicouches du gaz sur la poudre analysée. Les courbes d'adsorption et désorption obtenues représentent les isothermes d'adsorption.⁴³

III.4.4.2. Objectifs :

- Détermination des surfaces spécifiques des solides.
- Diamètres des pores.
- Taille des pores et leurs distributions : microporosité, mésoporosité et macroporosité.
- Isothermes d'adsorption/désorption.⁴³

III.4.4.3. Caractéristiques :

- Analyses des solides en poudres.
- Mesure sans modification de l'échantillon.
- Analyse longue. L'appareil est piloté par un progiciel permettant l'acquisition et le traitement des données.⁴³

IV.4. L'analyse thermogravimétrique (ATG)

En anglais thermogravimetric analysis (TGA), est une technique d'analyse thermique qui consiste en la mesure de la variation de d'un échantillon en fonction du temps, pour une ou un profil de température donné.

IV.4.1. Dispositif expérimental

Les mesures s'effectuent à l'aide de thermobalance qui comporte trois parties fondamentales :

- La balance pour la pesée.
- Le four.
- Le dispositif d'enregistrement.

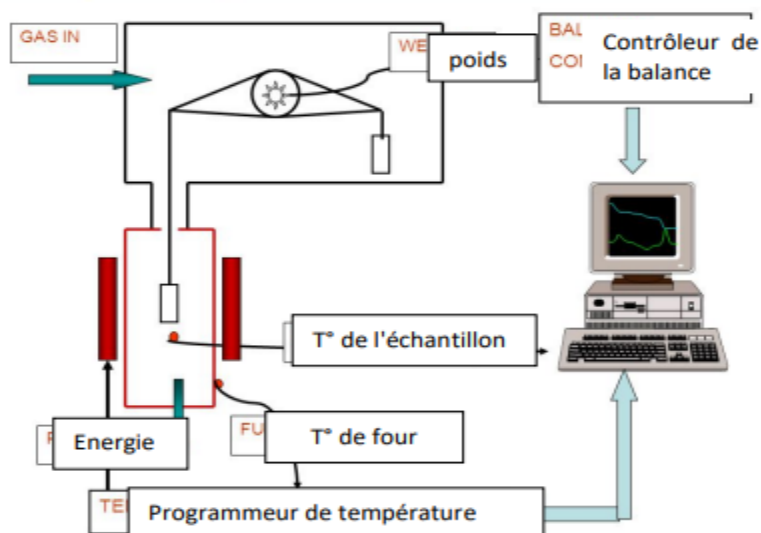


Figure 14: Présentation schématique d'un dispositif d'analyse thermogravimétrique.

IV.4.2. Résultats

Les résultats d'une expérience se traduisent par le tracé d'une courbe thermogravimétrique où la masse de l'échantillon est portée en ordonnée et le temps en abscisse.

IV.4.3. Applications

On fait appel à cette technique pour :

- Déterminer la stabilité thermique d'un composé.
- Connaitre l'hydratation des composés.
- Isoler les phases intermédiaires qui prennent naissance pendant le traitement thermique Déceler d'éventuelles impuretés.
- Suivre une oxydation ou une réduction.

III.5. Conclusion

À l'issue de ce chapitre, il ressort que les noyaux de dattes et le marc de café représentent des biomasses locales à fort potentiel pour la production de charbon actif. Leur composition physico-chimique, alliée à leur disponibilité, en fait des matières premières stratégiques dans une logique d'économie circulaire. La présentation des protocoles de préparation a permis de mettre en évidence les étapes clés du processus d'activation, influençant directement les propriétés du matériau final. De plus, les différentes techniques de caractérisation étudiées (MEB, DRX, FTIR, BET) offrent une base solide pour l'évaluation de la qualité du charbon actif produit, en lien avec ses performances futures. Cette étape constitue une avancée importante dans le cadre de la valorisation des déchets organiques à des fins environnementales et industrielles.

Références bibliographiques :

- (33) Abdelmalek, khaoula; Boufarou, hadjer. Préparation et caractérisation d'un charbon de marc de café, Larbi TEBESSI-Tébessa, 2020. <http://oldspace.univ-tebessa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1381> (accessed 2025-06-14).
- (34) BRIKCI NIGASSA, H. Etude physicochimique et effets biologiques de « la poudre de noyau de datté » chez le rat Wistar, ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEM, 2020. <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/16547/1/BrikciNigassa.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (35) *Les bienfaits et utilisations des noyaux de dattes - L'écho Tunisien*. <https://lecho.tunisien.com/les-bienfaits-et-utilisations-des-noyaux-de-dattes/> (accessed 2025-06-14).
- (36) *Study of chemical composition of date stones for use in animal feed*. <http://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd21/5/boud21069.htm> (accessed 2025-06-14).
- (37) Boussena, Z. Etude de la composition chimique et microbiologique de noyaux de variétés de dattes Algériennes en vue de la valorisation dans le domaine alimentaire. Thesis, univ.blida1, 2012. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/6781> (accessed 2025-06-14).
- (38) Boussena, Z.; Khali, M. Extraction et composition chimique d'huile de noyaux de dattes algériennes. [Extraction and chemical composition of algerian date seeds oil]. *Nutr. Santé* **2016**, 5 (2), 100–106.
- (39) Benakli, L. Valeur nutritive de la poudre de noyaux de dattes, Université Mouloud Mammeri, 2021. <https://dSPACE.ummto.dz/handle/ummto/18906> (accessed 2025-06-14).
- (40) *Analyse de matériaux par DRX (Diffraction des Rayons X)*. FILAB. <https://filab.fr/nos-moyens-techniques/analyse-et-caracterisation-des-materiaux-par-diffraction-des-rayons-x-drx-en-laboratoire/filab-caracterise-vos-mineraux-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (41) *Analyse DRX en laboratoire - YesWeLab - Blog*. <https://blog.yeswelab.fr/plantes-cosmetiques/analyse-drx-laboratoire/> (accessed 2025-06-14).
- (42) *Décrypter la Cristallinité : Analyse des Poudres par DRX en Laboratoire*. <https://bplc.fr/laboratoire-dessais/services-et-prestations-des-laboratoires-dessais/prestation-de-laboratoire-de-chimie-analytique-et-organique/analyses-en-laboratoire-de-caracterisation-et-cristallinite-des-poudres-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (43) Fiche-N°6-Appareil-BET.Pdf. <https://www.fs-umi.ac.ma/wp-content/uploads/2020/10/Fiche-N%C2%B06-Appareil-BET.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (44) *Analyse de porosité BET - Département de chimie - Université de Sherbrooke*. <https://www.usherbrooke.ca/chimie/services/thermomecanique/bet> (accessed 2025-06-14).

CHAPITRE 4 :

Résultats et discussions

IV. Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Dans un contexte de valorisation des déchets organiques et de développement de solutions durables, la production de charbon actif à partir de biomasses locales représente une alternative prometteuse, à la fois économique et respectueuse de l'environnement. Ce chapitre s'intéresse à deux résidus agroalimentaires abondants en Algérie : **les noyaux de dattes et le marc de café**, choisis comme matières premières pour l'élaboration du charbon actif.

Après avoir présenté leurs **caractéristiques physico-chimiques** et leurs principales utilisations, nous détaillerons les **étapes clés du protocole de préparation** du charbon actif, en mettant l'accent sur les paramètres influençant sa qualité (température de pyrolyse, agent activant, temps de traitement). Enfin, nous aborderons les **techniques de caractérisation avancées (MEB, DRX, BET, FTIR, ATG)**, essentielles pour évaluer les propriétés structurales, texturales et fonctionnelles du matériau obtenu.

IV.2. Résultats de la caractérisation du charbon actif extrait du marc de café :

IV.2.1. Analyse MEB du charbon actif :

➤ Avant pyrolyse :

Cependant pour plus de détails sur la morphologie des particules, il est nécessaire de compléter l'analyse par microscopie électronique à balayage MEB. Les images de microscopie électronique à balayage de la surface externe des charbons actifs préparés sont présentées sur les figures suivantes :

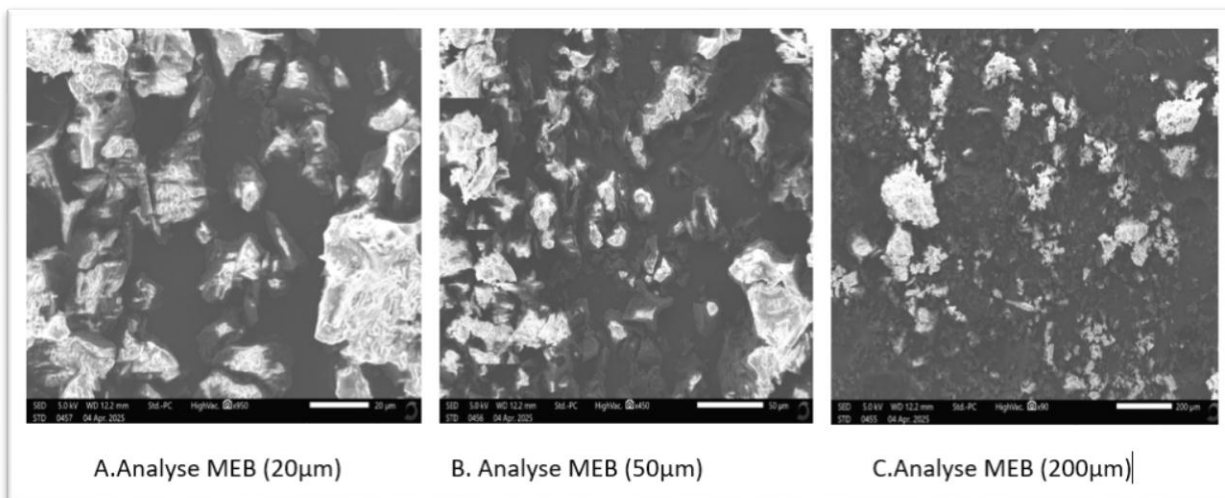


Figure 15: Analyse MEB du marc du café avant pyrolysé.

➤ Analyse des figures :

L'observation du charbon actif issu du marc de café par Microscopie Électronique à Balayage (MEB) a permis d'obtenir des informations précieuses sur la morphologie de surface et la distribution des pores, éléments essentiels pour évaluer les performances adsorbantes du matériau.

À faible grossissement, la surface du charbon actif apparaît globalement hétérogène, présentant de nombreuses cavités et aspérités réparties de manière irrégulière. Lorsque l'on augmente le grossissement, on distingue plus nettement la présence de pores de différentes tailles, allant des micropores aux mésopores. La structure poreuse semble continue, avec des

cavités interconnectées qui traversent la matrice du charbon, ce qui est favorable à la diffusion des molécules adsorbées.

De plus, les images MEB mettent en évidence la présence de pores en forme de fente, relativement homogènes, ainsi que quelques pores de diamètre plus important (mésopores). Cette morphologie particulière suggère que le processus d'activation appliqué au marc de café a permis de développer une porosité adaptée à l'adsorption de molécules de taille variée. On observe également la présence de fissures capillaires et de grains de différentes tailles, incrustés dans des cavités plus larges, ce qui confère au matériau une surface spécifique élevée.

Il est à noter que, comparé à certains charbons actifs issus d'autres biomasses, le charbon actif de marc de café présente une surface relativement lisse par endroits, avec un nombre de pores en forme de fente légèrement inférieur. Cela pourrait indiquer une porosité globale un peu moindre, mais la continuité des cavités et la présence de mésopores restent des atouts majeurs pour les applications d'adsorption, notamment dans le traitement des eaux usées.

En conclusion, l'analyse MEB confirme que le charbon actif obtenu à partir du marc de café possède une structure poreuse bien développée, caractérisée par une diversité de formes et de tailles de pores. Cette architecture morphologique justifie l'efficacité du matériau pour l'adsorption de divers polluants, et met en avant l'intérêt de valoriser le marc de café comme précurseur pour la production de charbons actifs performants.

Tableau IV.10 : Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif

ElementLine		Mass%	Atom%
C	K	56.92±0.55	63.77±0.61
O	K	43.08±1.13	36.23±0.95
Total		100.00	100.00
Map_009_wholespectrum		Fitting ratio 0.6412	

➤ **Composition chimique dominante :**

- **Carbone (C)** : 56,92 % en masse (63,77 % en atomes)
- **Oxygène (O)** : 43,08 % en masse (36,23 % en atomes)
→ Le matériau est principalement constitué de carbone, avec une quantité significative d'oxygène, typique d'un charbon actif contenant des groupes fonctionnels oxygénés (carbonyle, hydroxyle, etc.).

➤ **Rapport C/O :**

- **En masse** : ~1,32
- **En atomes** : ~1,76
→ La teneur élevée en carbone confirme une bonne carbonisation, tandis que la présence d'oxygène suggère une surface chimiquement active, favorable pour l'adsorption de polluants polaires (métaux lourds, composés organiques).

Ce charbon actif présente une composition équilibrée entre carbone (structure poreuse) et oxygène (sites actifs), ce qui est idéal pour des applications d'adsorption. L'absence d'autres éléments (métaux, impuretés) confirme sa pureté.

Tableau IV.11 : Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif

Chemical formula	Line	Mass%	Mol%	Cation
C	K	100.00±0.9	100.00±0.9	0.00
O	K			
Total		100.00	100.00	
Map_009_wholespectrum		Fitting ratio 0.6412		

- **Composition exclusive :**
 - **Carbone (C)** : 100% en masse et en quantité de matière (Mol%).
 - **Oxygène (O)** : Non détecté ou en quantité négligeable (non indiqué).
- **Interprétation :**
 - Le matériau analysé est **pur à 100% en carbone**, sans impuretés détectables (aucun autre élément n'est rapporté).
 - Cela suggère une carbonisation complète ou un traitement ayant éliminé tous les groupes fonctionnels oxygénés (contrairement à l'analyse précédente où O était présent).

Ce résultat pourrait correspondre à :

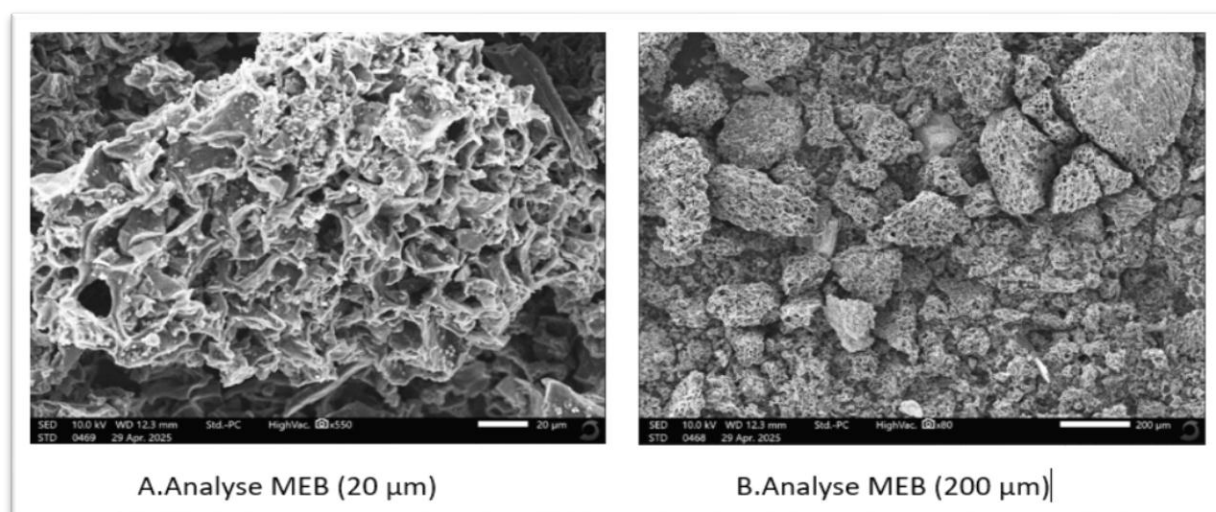
- Un **charbon activé hautement purifié** (après pyrolyse à haute température).
- Un **graphite** ou matériau carboné non oxydé.
- Une **limite de détection** de l'EDS (si l'oxygène était présent en traces < 1%).

Tableau IV.12 : Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif

Chemical formula	Line	Mass%	Mol%	Cation
C	K	100.00±0.6	100.00±0.6	0.00
O	K			
Total		100.00	100.00	
Map_010_wholespectrum		Fitting ratio 0.6277		

- **Composition détectée :**
 - **Carbone (C)** : 100% en masse (*Mass%*) et en moles (*Mol%*), avec une faible incertitude de mesure (±0.6%).
 - **Oxygène (O)** : Absent ou en quantité inférieure au seuil de détection de l'appareil (non rapporté).
- **Interprétation des résultats :**
 - **Pureté extrême** : Le matériau analysé est constitué **exclusivement de carbone**, sans contamination par d'autres éléments (ex. oxygène, métaux, etc.).
 - **Origine possible :**
 - Charbon actif **totalelement désoxygéné** par pyrolyse à très haute température.
 - Graphite ou autre forme allotropique pure du carbone.
 - Artefact de mesure (si l'échantillon était trop épais pour détecter les éléments légers comme O).

Le tableau indique un matériau composé à 100% de carbone, suggérant une pureté extrême ou une limite de détection pour l'oxygène.

➤ **Après pyrolyse****Figure 16:** Analyse MEB du marc du café pyrolysé.➤ **Analyse des figures :**

Les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) permettent d'observer la **morphologie de surface** et la **structure interne** du charbon actif issu du marc de café après pyrolyse.

- L'ensemble des observations révèle une **structure poreuse bien développée**, résultant de la dégradation thermique des constituants organiques de la biomasse.
- Le matériau présente des **particules de formes irrégulières**, aux contours fracturés, ainsi qu'une **texture rugueuse** et désordonnée. Cette morphologie témoigne de la formation de **réseaux poreux ouverts**, qui s'étendent aussi bien à la surface qu'au sein de la masse du charbon. Les cavités visibles sont de tailles variées, interconnectées, et correspondent à des **pores créés par la libération de composés volatils** durant la pyrolyse.
- La disposition hétérogène des fragments solides, ainsi que la présence de **microstructures internes poreuses**, indique que le charbon actif obtenu est doté d'une **porosité multi-échelle** (micro et méso), favorable à l'adsorption. Ces caractéristiques offrent une **surface spécifique élevée**.

Tableau IV.13 : Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	71.74 ± 0.77	79.61 ± 0.86
N	K	8.75 ± 1.34	8.33 ± 1.27
O	K	10.62 ± 0.85	8.85 ± 0.71
Na	K	0.30 ± 0.10	0.17 ± 0.06
Mg	K	1.59 ± 0.20	0.87 ± 0.11
P	K	1.90 ± 0.25	0.82 ± 0.11
Cl	K	0.09 ± 0.09	0.03 ± 0.03
K	K	1.51 ± 0.32	0.52 ± 0.11
Fe	K	0.95 ± 0.75	0.23 ± 0.18
Ni	K	2.13 ± 2.06	0.48 ± 0.47
Cu	L	0.41 ± 0.20	0.09 ± 0.04
Zn	L	nd	nd
Total		100.00	100.00
Map_004_wholespectrum		Fitting ratio 0.6891	

➤ **Composition chimique dominante :**

- **Carbone (C)** : 71,74 % en masse (79,61 % en atomes)
- **Oxygène (O)** : 10,62 % en masse (8,85 % en atomes)
- **Azote (N)** : 8,75 % en masse (8,33 % en atomes)

→ Le matériau est majoritairement composé de carbone, ce qui confirme une carbonisation efficace du marc de café. La présence significative d'oxygène et d'azote indique la conservation de groupes fonctionnels (hydroxyle, carboxyle, amines) typiques des biomasses pyrolysées. Ces éléments améliorent la réactivité de surface, favorable pour l'adsorption de polluants polaires (métaux lourds, composés organiques).

➤ **Rapports clés :**

• **Rapport C/O :**

- **En masse** : $71,74 / 10,62 \approx 6,75$
- **En atomes** : $79,61 / 8,85 \approx 9,00$

→ Ce rapport élevé confirme une **forte dominance du carbone**, suggérant une structure très graphitisée, mais avec suffisamment de sites oxygénés pour une bonne affinité avec les molécules polaires.

• **Rapport C/N :**

- **En masse** : $71,74 / 8,75 \approx 8,20$
- **En atomes** : $79,61 / 8,33 \approx 9,56$

→ La présence d'azote (provenant des protéines du marc de café) pourrait conférer des propriétés basiques au charbon, utile pour l'adsorption de composés acides ou de métaux cations.

➤ **Après activation chimique :**

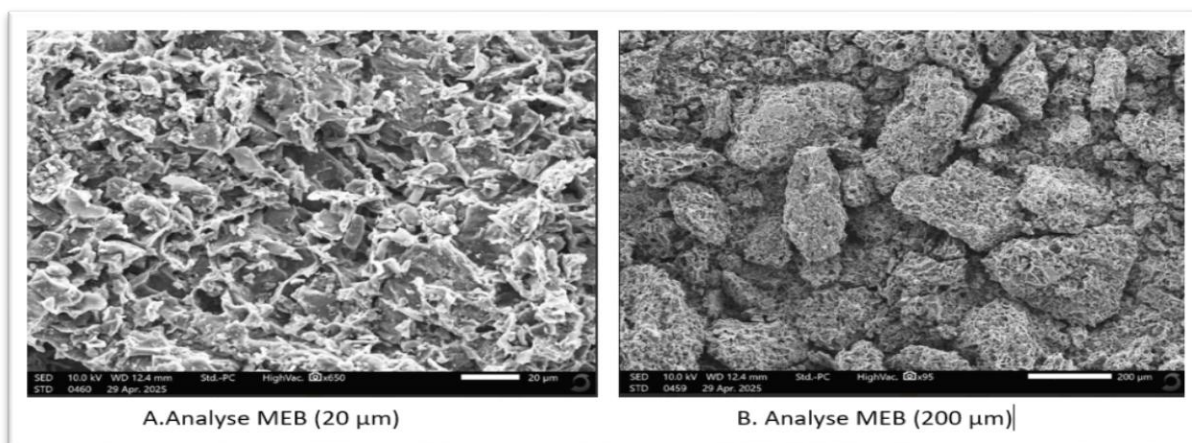


Figure 17: Analyse MEB du marc du café pyrolysé et activé.

➤ **Analyse des figures :**

- L'observation par microscopie électronique à balayage (MEB) du charbon actif issu du marc de café après activation chimique révèle des modifications significatives de la structure de surface par rapport au matériau simplement pyrolysé. Les deux images montrent un matériau caractérisé par une morphologie poreuse et fracturée, résultant directement de l'effet de l'agent chimique utilisé pendant l'activation (H_3PO_4).
- La surface observée apparaît plus irrégulière, disloquée, avec des formations granuleuses de tailles diverses. La structure du charbon montre des cavités bien ouvertes et des zones de dissolution partielle, typiques d'une attaque chimique ayant permis d'élargir les pores.

et de générer une porosité plus développée. Ce traitement contribue à augmenter la surface spécifique ainsi que la connectivité entre les pores, ce qui est essentiel pour les performances d'adsorption.

- On observe également que les particules carbonées ont tendance à présenter des parois internes perforées, des fractures multiples et des textures spongieuses, ce qui confirme l'efficacité du procédé d'activation. Ces caractéristiques traduisent une déstructuration contrôlée de la matrice carbonée, favorable à la création de micro- et mésopores interconnectés.

Tableau IV.14 : Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	66.71 ± 0.70	75.20 ± 0.79
N	K	9.54 ± 1.31	9.22 ± 1.27
O	K	13.87 ± 0.93	11.74 ± 0.78
Na	K	0.13 ± 0.07	0.08 ± 0.04
Mg	K	1.96 ± 0.21	1.09 ± 0.12
P	K	1.59 ± 0.22	0.70 ± 0.10
Cl	K	0.08 ± 0.08	0.03 ± 0.03
K	K	1.17 ± 0.27	0.40 ± 0.09
Ca	K	3.80 ± 0.51	1.28 ± 0.17
Fe	K	0.55 ± 0.57	0.13 ± 0.14
Ni	K	nd	nd
Cu	L	0.61 ± 0.21	0.13 ± 0.05
Zn	L	nd	nd
Total		100.00	100.00
Map_001_wholespectrum		Fitting ratio 0.6863	

➤ **Composition chimique dominante**

- **Carbone (C) : 66,71 % en masse (75,20 % en atomes) → Structure carbonée majoritaire**, légèrement réduite par rapport à la pyrolyse seule (71,74 %), probablement due à l'oxydation partielle lors de l'activation chimique.
- **Oxygène (O) : 13,87 % en masse (11,74 % en atomes) → Augmentation significative** par rapport à la pyrolyse seule (10,62 %), liée à l'introduction de groupes fonctionnels oxygénés (C=O, P=O) par $H_3 PO_4$.
- **Azote (N) : 9,54 % en masse (9,22 % en atomes) → Teneur stable**, provenant des protéines résiduelles du marc de café.

➤ **Rapports clés :**

- **C/O : 4,81 (masse) | 6,41 (atomes) → Ratio inférieur** à celui du charbon pyrolysé seul (6,75), confirmant une **surface plus oxydée** et donc plus polaire.
- **C/N : 7,00 (masse) | 8,16 (atomes) → Légère diminution** vs pyrolyse seule, reflétant une meilleure rétention de N malgré l'activation acide.

➤ **Impact de l'activation à l'acide phosphorique**

- **Phosphore (P) : 1,59 % en masse → Présence confirmant** l'incorporation de P dans la matrice carbonée (formation de liaisons C-O-P ou P=O), typique de l'activation par $H_3 PO_4$. Ces groupes améliorent :
 - **L'acidité de surface** (utile pour adsorber des cations métalliques ou composés basiques).

- **La porosité** ($H_3 PO_4$ agit comme agent gonflant lors de la carbonisation).
- **Après deuxième pyrolyse :**

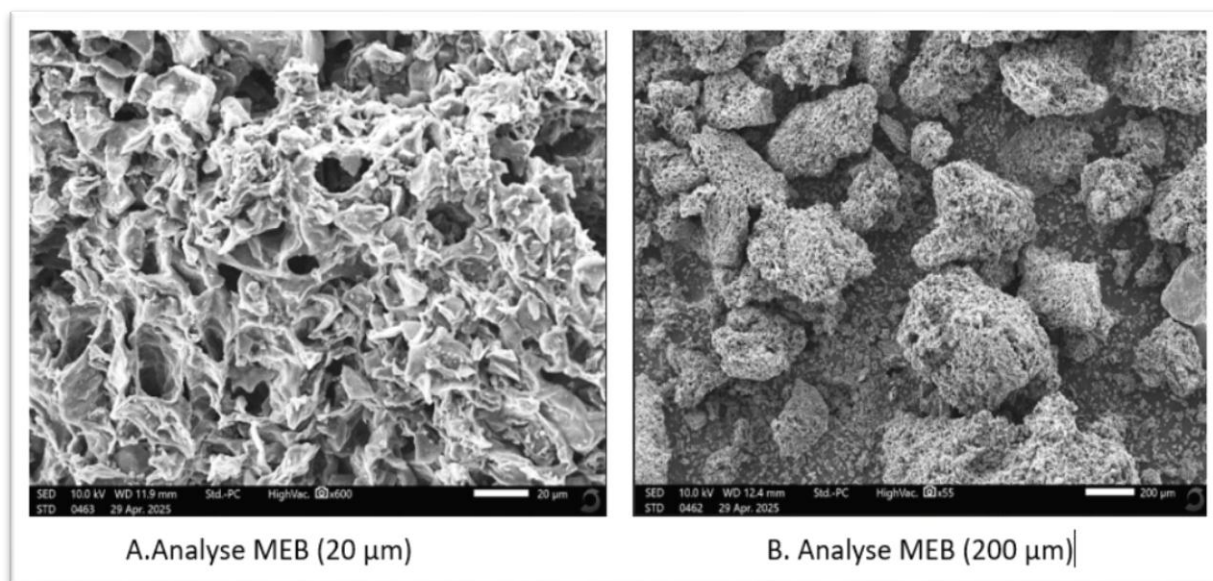


Figure 18: analyse MEB du marc du café après deuxième pyrolyse.

- **Analyse des figures :**
- Les deux images confirment que la double pyrolyse du marc de café a permis d'obtenir un charbon actif très poreux, avec une structure interne développée et une granulométrie adaptée aux applications d'adsorption.
- La porosité observée à l'échelle microscopique (A) et la structure granulaire à l'échelle macroscopique (B) sont des indicateurs de la qualité du charbon actif obtenu, avec une surface spécifique élevée et une bonne accessibilité des sites actifs.

En conclusion, le charbon actif préparé à partir de marc de café après une deuxième pyrolyse présente une structure poreuse optimale, à la fois sur le plan microstructural et granulaire, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications de filtration et

Tableau IV.15 : Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	67.73±0.97	77.43±1.11
N	K	9.51±1.81	9.33±1.77
O	K	9.64±1.06	8.27±0.91
Na	K	0.06±0.08	0.03±0.05
Mg	K	1.85±0.28	1.05±0.16
P	K	2.21±0.35	0.98±0.15
Cl	K	0.18±0.15	0.07±0.06
K	K	2.67±0.53	0.94±0.19
Ca	K	4.21±0.73	1.44±0.25
Fe	K	0.61±0.88	0.15±0.22
Ni	K	1.08±2.22	0.25±0.52
Cu	L	0.13±0.24	0.03±0.05
Zn	L	0.12±0.20	0.03±0.04
Total		100.00	100.00
Map_002_wholespectrum		Fitting ratio 0.6979	

➤ **Composition chimique dominante**

- **Carbone (C)** : 67,73 % en masse (77,43 % en atomes) → Augmentation par rapport à l'échantillon activé à l' H_3PO_4 (66,71 %), confirmant une carbonisation plus poussée lors de la 2^e pyrolyse.
- **Oxygène (O)** : 9,64 % en masse (8,27 % en atomes) → Diminution significative par rapport à l'échantillon activé (13,87 %), due à l'élimination de groupes fonctionnels oxygénés instables à haute température.
- **Azote (N)** : 9,51 % en masse (9,33 % en atomes) → Teneur stable, suggérant une rétention des composés azotés malgré la pyrolyse répétée.

➤ **Rapports clés :**

- **C/O** : 7,03 (masse) | 9,36 (atomes) → Ratio nettement plus élevé que l'échantillon activé (4,81), indiquant une surface moins polaire et plus graphitique.
- **C/N** : 7,12 (masse) | 8,30 (atomes) → Similaire à l'étape d'activation, confirmant la stabilité des groupes azotés.

➤ **Pureté et qualité du charbon après le deuxième pyrolyse**

- **Avantages :**
 - Teneur en carbone optimisée (structure plus stable et moins hydrophile).
 - Rétention du phosphore → Maintien des propriétés catalytiques/acides.

IV.2.2. Analyse FTIR :

L'analyse FTIR (Fourier Transform InfraRed) a été réalisée afin d'identifier les groupements fonctionnels présents au cours des différentes étapes de préparation du charbon actif : **avant pyrolyse**, **après pyrolyse**, **après activation chimique**, et **après une deuxième pyrolyse**. Les spectres obtenus révèlent l'évolution structurale de la biomasse carbonisée sous l'effet des traitements thermiques et chimiques.

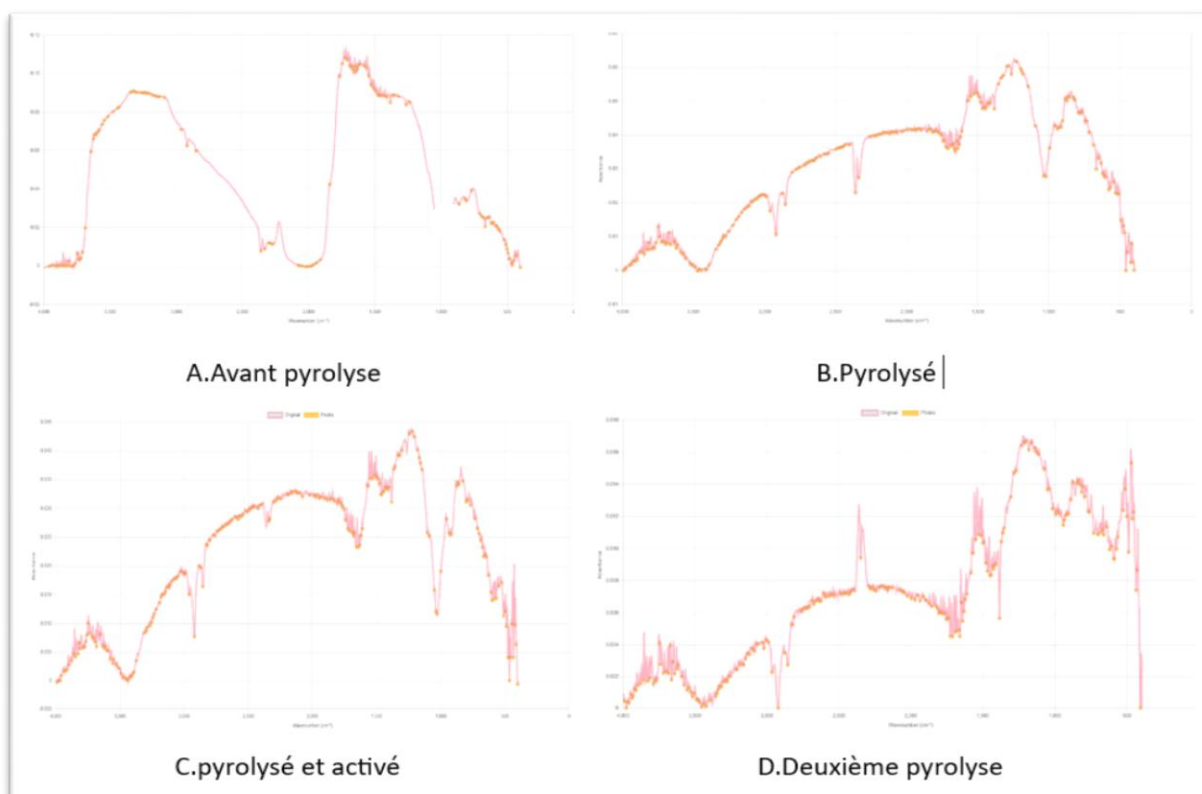


Figure 19: Analyse FTIR du charbon actif durant les 4 étapes.

➤ Avant pyrolyse

Le spectre infrarouge de l'échantillon brut, c'est-à-dire le marc de café avant pyrolyse, présente plusieurs bandes caractéristiques :

- **603,39 cm^{-1}** : Bande faible à moyenne correspondant à la liaison C–Cl (halogénures organiques), indiquant la possible présence de résidus chlorés issus de traitements ou d'additifs.
- **770,28 cm^{-1}** : Bande forte attribuée à des groupements benzéniques disubstitués en position méta (meta-disubstituted benzene), typiques des composés aromatiques contenus naturellement dans la biomasse.
- **2276,6 cm^{-1}** : Bande faible correspondant à une liaison nitrile ($\text{C}\equiv\text{N}$), suggérant la présence d'azote organique, possiblement issu des protéines ou alcaloïdes naturellement présents dans le café.

Ces pics indiquent la complexité chimique de la matière organique initiale, riche en hétéroatomes (N, Cl) et en structures aromatiques.

➤ Après pyrolyse

La pyrolyse effectuée à haute température a modifié profondément la structure chimique du matériau, comme le montrent les nouvelles bandes observées :

- **1479,22 cm^{-1}** : Bande forte liée à la déformation du C–H des cycles aromatiques, confirmant l'augmentation de la teneur en structures aromatiques condensées, caractéristiques du charbon.
- **3021,21 cm^{-1}** : Bande moyenne associée à la vibration d'élongation des liaisons $\text{C}=\text{CH}$ (alchènes ou aromatiques non saturés), signalant une aromatisation accrue.
- **2721,65 cm^{-1}** : Bande moyenne qui pourrait correspondre à des vibrations C–H aldéhydiques, indiquant la formation de groupes carbonyles légers.

L'intensification des bandes aromatiques témoigne de la carbonisation partielle de la matière organique et de la perte progressive des composés aliphatiques et fonctionnels volatils.

➤ Après activation chimique (pyrolysé et activé)

L'activation chimique (par exemple avec KOH ou H_3PO_4) entraîne une restructuration de la surface carbonée et l'introduction ou la stabilisation de nouveaux groupes fonctionnels :

- **3022,63 cm^{-1}** : Bande forte de $\text{C}=\text{CH}$, confirmant la persistance des domaines insaturés et aromatiques.
- **2340,79 cm^{-1}** : Bande forte caractéristique du dioxyde de carbone ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$), pouvant refléter la formation de groupes carbonyles ou carboxyliques acides sur la surface.
- **1265,25 cm^{-1}** : Bande moyenne du C–H, probablement liée à des groupements méthylènes en environnement aromatique ou conjugué.

L'apparition de ces bandes indique que l'activation a permis de développer des sites fonctionnels oxygénés, favorables à l'adsorption.

➤ Après deuxième pyrolyse

Une seconde pyrolyse a été réalisée pour stabiliser la structure et éliminer les résidus non carbonés. Le spectre FTIR montre :

- **2347,90 cm^{-1}** : Bande forte de $\text{O}=\text{C}=\text{O}$, confirmant une concentration notable de groupements carbonyles, liés à la présence de CO_2 adsorbé ou à des groupes acides en surface.
- **1479,22 cm^{-1} et 1268,11 cm^{-1}** : Bandes fortes du C–H en configuration aromatique et aliphatique, illustrant une structure carbonée partiellement fonctionnalisée.
- **904,36 cm^{-1}** : Bande forte typique du groupement vinyène ($\text{C}=\text{CH}_2$), indiquant la présence de doubles liaisons terminales ou de résidus insaturés non cycliques.

Ces pics confirment la complexité structurale du charbon activé final, contenant à la fois des domaines graphitiques, des sites insaturés et des groupes oxygénés.

IV.2.2.1. Évolution des groupements fonctionnels : comparaison des spectres FTIR

L'évolution des spectres FTIR reflète les transformations chimiques majeures subies par le marc de café lors des différentes étapes de traitement thermique et chimique. Voici une comparaison des principales tendances observées :

- **Disparition progressive des groupes initiaux (avant pyrolyse → après pyrolyse)**
 - Avant pyrolyse, le spectre montre des bandes C–Cl ($603,39\text{ cm}^{-1}$), $\text{C}\equiv\text{N}$ ($2276,6\text{ cm}^{-1}$), et cycles benzéniques ($770,28\text{ cm}^{-1}$), typiques des composés naturels azotés et chlorés présents dans la biomasse.
 - Après pyrolyse, ces pics ont disparu, ce qui confirme la dégradation thermique des composés organiques volatils et l'élimination des hétéroatomes (Cl, N).
 - De nouvelles bandes apparaissent, notamment C–H aromatique ($1479,22\text{ cm}^{-1}$) et C=CH (3021 cm^{-1}), indiquant une aromatisation croissante due à la carbonisation.
- Donc, on a une transformation chimique majeure par perte des groupements fonctionnels initiaux et formation de structures aromatiques.

- **Apparition de groupes fonctionnels oxygénés après activation**
 - Après activation, le spectre présente une forte bande à $2340,79\text{ cm}^{-1}$ ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$), absente dans les étapes précédentes. Elle est associée à des groupes carbonyles (acides carboxyliques ou CO_2 adsorbé), très réactifs.
 - Le pic C–H à 1265 cm^{-1} persiste, et celui de C=CH (3022 cm^{-1}) reste visible et fort.
- Donc, L'activation chimique introduit ou stabilise des groupements oxygénés, essentiels pour l'adsorption, en augmentant la polarité de la surface.

- **Stabilisation et enrichissement après la deuxième pyrolyse**
 - Lors de la deuxième pyrolyse, on observe :
 - Le maintien du groupe carbonyle ($2347,90\text{ cm}^{-1}$).
 - La persistance du C–H aromatique ($1479,22\text{ cm}^{-1}$) et aliphatique ($1268,11\text{ cm}^{-1}$).
 - L'apparition du groupement vinyène ($\text{C}=\text{CH}_2$ à $904,36\text{ cm}^{-1}$), montrant des structures insaturées terminales, signes de défauts de structure qui peuvent améliorer l'adsorption.

Donc, La deuxième pyrolyse affine la structure du charbon actif en augmentant la pureté carbonée, tout en conservant les groupements oxygénés nécessaires à la fonctionnalité chimique.

Tableau IV.16 : Résumé de l'évolution structurale

Étape	Groupes caractéristiques	Observation principale
Avant pyrolyse	C–Cl, $\text{C}\equiv\text{N}$, cycle benzénique	Présence de composés organiques variés (azotés, aromatiques).
Pyrolyse	C–H aromatique, C=CH	Dégradation des impuretés, formation de noyaux aromatiques.
Activation chimique	$\text{O}=\text{C}=\text{O}$, C=CH, C–H	Introduction de fonctions oxygénées, surface plus polaire.
Deuxième pyrolyse	$\text{O}=\text{C}=\text{O}$, C–H, $\text{C}=\text{CH}_2$	Stabilisation de la structure, persistance des groupes actifs.

L'analyse FTIR tout au long du procédé montre une évolution progressive de la matière organique vers une structure carbonée complexe, enrichie en fonctions oxygénées actives. Cette transformation est essentielle pour le développement de propriétés d'adsorption du charbon actif, destinées à des applications telles que la dépollution ou la filtration.

L'évolution des spectres FTIR met clairement en évidence la transition d'une biomasse complexe vers un matériau carboné structuré et fonctionnalisé. À chaque étape :

- **La pyrolyse** simplifie la matrice organique.
- **L'activation** enrichit la surface en groupes oxygénés actifs.
- **La seconde pyrolyse** permet une meilleure stabilité thermique tout en conservant les sites fonctionnels clés pour l'adsorption.

IV.2.3. L'analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse ATG permet d'étudier la stabilité thermique et la perte de masse d'un matériau en fonction de la température. Les courbes ci-dessous représentent la variation de la masse (en %) en fonction de la température (°C) pour quatre échantillons à différentes étapes de traitement : brut (avant pyrolyse), après pyrolyse, après activation, et après une deuxième pyrolyse.

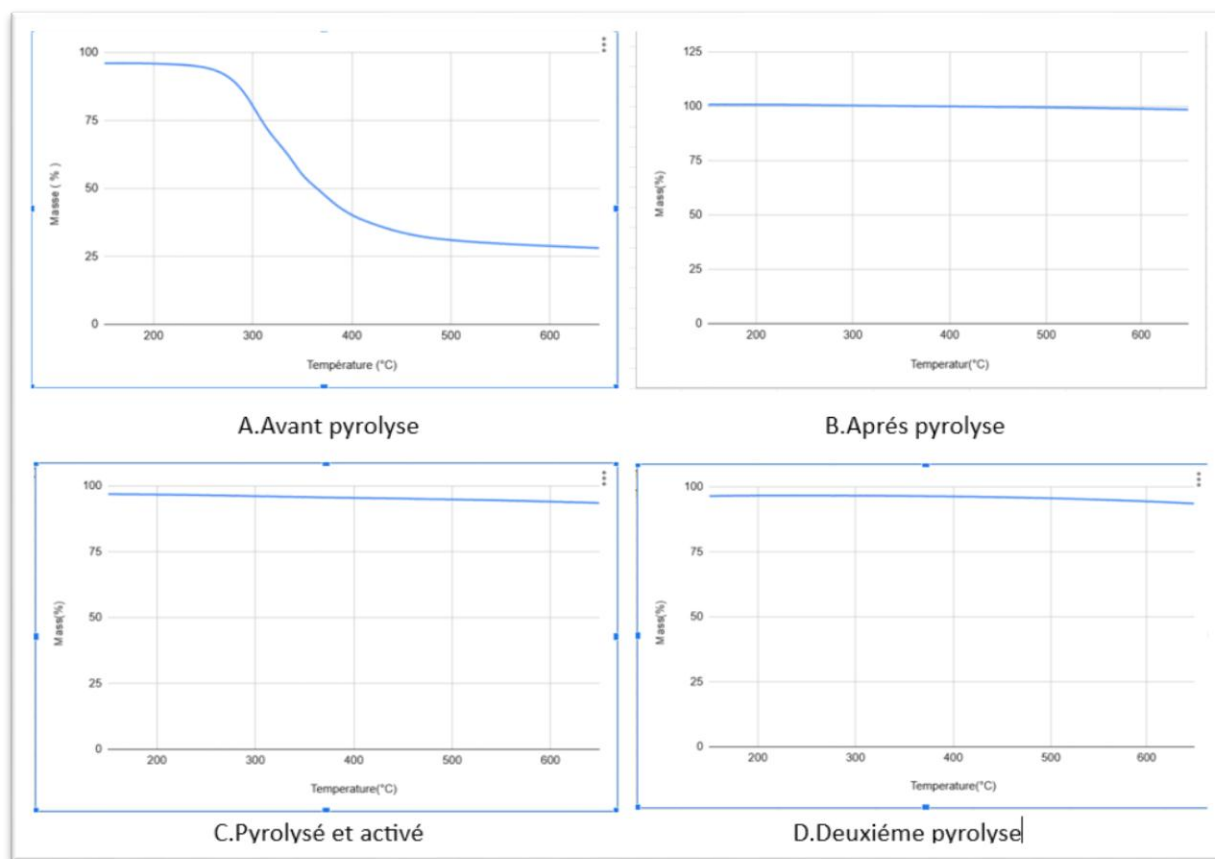


Figure 20: ATG du charbon actif durant les 4 étapes.

A. Avant pyrolyse (échantillon brut)

- **Forme de la courbe :** On observe une perte de masse significative à partir de 200 °C, atteignant environ 70 % à 600 °C.
- **Interprétation :**
 - La première perte (en dessous de 150 °C) correspond à l'évaporation de l'eau libre et de l'humidité résiduelle.

- La forte perte entre 200 et 400 °C reflète la décomposition thermique de la matière organique, notamment les hémicelluloses, la cellulose et la lignine du marc de café.

Ce comportement est typique des biomasses riches en composés volatils.

B. Après pyrolyse

- **Forme de la courbe** : La courbe reste pratiquement plate, avec une très faible diminution de la masse (moins de 5 %).
- **Interprétation** :
 - Ce profil indique une bonne stabilité thermique.
 - La matière organique la plus réactive a déjà été décomposée pendant la première pyrolyse.

Le résidu solide après pyrolyse est principalement constitué de carbone fixe et de matière minérale.

C. Après activation chimique

- **Forme de la courbe** : Une légère décroissance de la masse est observée, mais plus importante que pour l'échantillon pyrolysé.
- **Interprétation** :
 - L'activation introduit souvent de nouveaux groupes fonctionnels ou augmente la surface spécifique, ce qui peut légèrement diminuer la stabilité thermique.
 - La structure poreuse activée peut aussi favoriser des pertes à température modérée.
- **Conclusion** : Le matériau activé est légèrement plus réactif, mais reste thermiquement stable jusqu'à environ 600 °C.

D. Deuxième pyrolyse

- **Forme de la courbe** : Très similaire à l'échantillon activé, avec une perte minime (< 5 %).
- **Interprétation** :
 - La seconde pyrolyse améliore la carbonisation, réduisant les composés volatils restants.
 - La matière est quasiment inerte thermiquement, ce qui est favorable pour des applications comme l'adsorption.

Confirme l'efficacité de la première pyrolyse et de l'activation. Le produit est thermiquement **très stable**.

Tableau IV.17 : Comparaison entre les échantillons.

Échantillon	Perte de masse (%)	Stabilité thermique	Observations principales
Avant pyrolyse (pur)	≈ 70 %	Faible	Décomposition importante de la biomasse
Après pyrolyse	≈ 2-5 %	Élevée	Matière carbonisée, peu de composants volatils
Pyrolysé et activé	≈ 5-7 %	Bonne	Réactivité modérée due à l'activation
Deuxième pyrolyse	≈ 3-5 %	Très élevée	Structure stabilisée, proche du charbon actif pur

IV.3. Résultats de la caractérisation du charbon actif extrait des noyaux de dattes :

IV.3.1. Analyse MEB

Pour une caractérisation approfondie de la morphologie des particules, une analyse par MEB a été réalisée. Les figures suivantes présentent les images obtenues de la surface externe des charbons actifs préparés.

➤ Avant pyrolyse

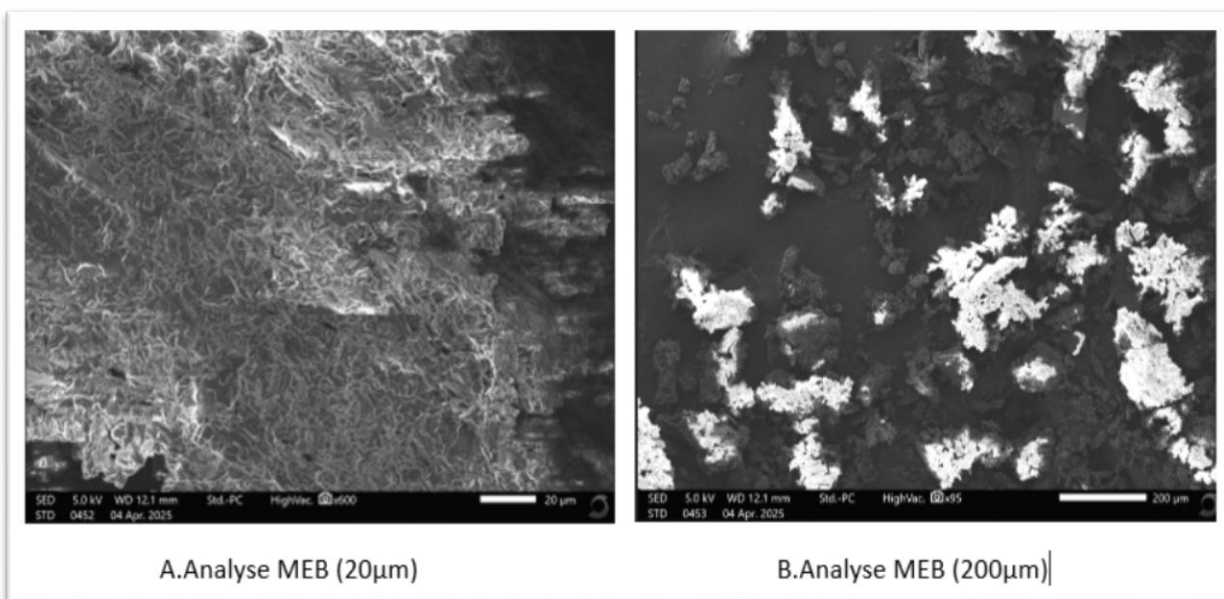


Figure 21: Analyse MEB des noyaux des dattes avant pyrolyse.

➤ Analyse des figures :

Les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) aux grossissements de 20 µm et 200 µm permettent d'étudier la morphologie de surface des noyaux de dattes avant traitement thermique.

Observations générales

- **Structure de base :** Le matériau brut présente une morphologie dense et compacte, caractéristique des biomasses lignocellulosiques non transformées.
- **Hétérogénéité :** La surface montre des zones contrastées entre régions lisses et zones fissurées, reflétant la composition complexe des noyaux.

Analyse à 200 µm (vue macroscopique)

- **Architecture globale :**
 - Présence de fissures naturelles (20-100 µm) formant un réseau discontinu
 - Zones de densité variable avec des amas compacts alternant avec des régions plus ouvertes
- **Potentiel porogène :** Ces macro-défauts constituent des précurseurs de porosité qui pourront évoluer lors de la pyrolyse en canaux de transport des gaz.

Analyse à 20 µm (vue microscopique)

- **Micro-texture :**
 - Surface **rugueuse** avec des aspérités de 1-5 µm

- Présence de **micro-fissures** (1-2 μm) connectant les structures plus larges
- Éléments globulaires probablement liés à des résidus cireux ou à des composés extractibles
- **Homogénéité locale** : La texture apparaît plus uniforme qu'à l'échelle macroscopique mais conserve des hétérogénéités de composition.

Tableau IV.18 : Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	56.92 $\pm$ 0.55	63.77 $\pm$ 0.61
O	K	43.08 $\pm$ 1.13	36.23 $\pm$ 0.95
Total		100.00	100.00
Map_009_wholespectrum		Fitting ratio 0.6412	

- **Composition élémentaire dominante**
 - **Carbone (C)** : 56,92 % en masse (63,77 % en atomes)
 - **Oxygène (O)** : 43,08 % en masse (36,23 % en atomes)
- Le matériau est principalement composé de **carbone** et **oxygène**, caractéristique d'une biomasse végétale non transformée.
- **Rapport C/O:**
- En masse: $56,92/43,08 \approx 1,32$
 - En atomes: $63,77/36,23 \approx 1,76$

→ Ce rapport relativement faible (comparé à un charbon pyrolysé) confirme le caractère **peu carbonisé** de la matière première, typique d'un état pré-pyrolytique.

➤ **Après activation chimique :**

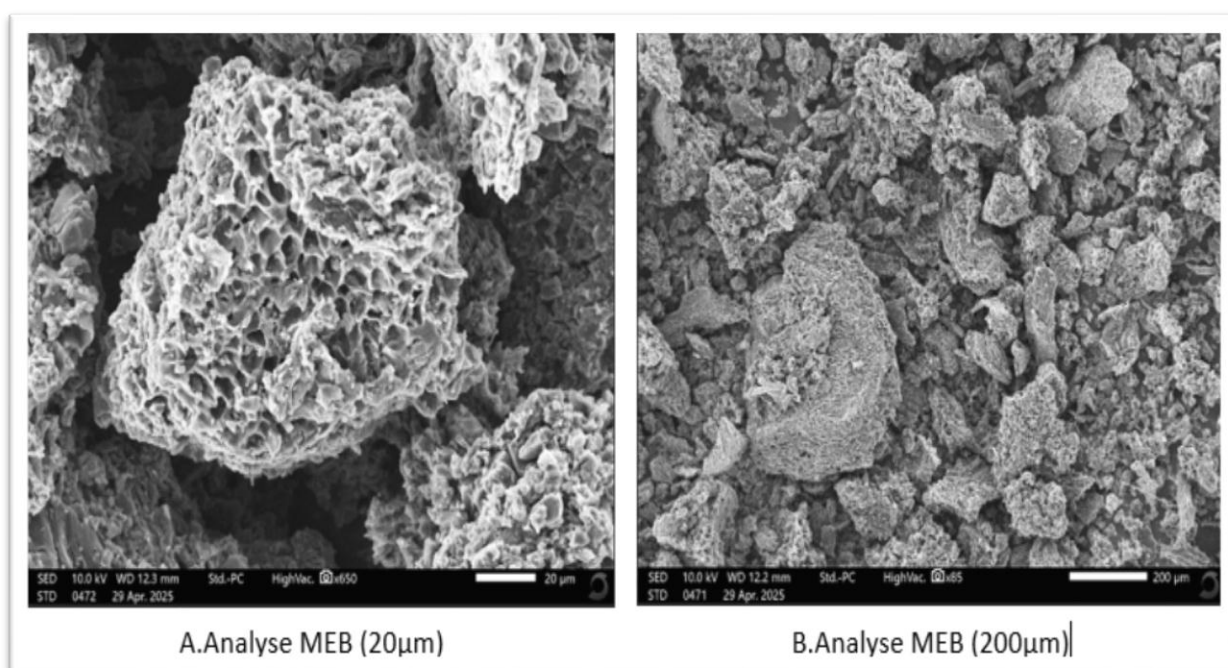
**Figure 22:** Analyse MEB des noyaux des dattes après activation chimique.

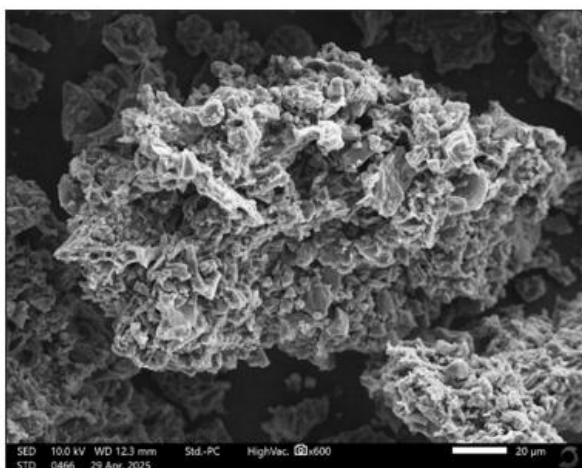
Tableau IV.19 : Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	74.08 ± 1.16	82.43 ± 1.29
N	K	7.87 ± 1.94	7.51 ± 1.85
O	K	8.99 ± 1.19	7.51 ± 0.99
Na	K	0.22 ± 0.14	0.13 ± 0.08
Mg	K	0.39 ± 0.17	0.21 ± 0.09
P	K	0.38 ± 0.19	0.16 ± 0.08
Cl	K	0.35 ± 0.21	0.13 ± 0.08
K	K	0.32 ± 0.26	0.11 ± 0.09
Ca	K	1.49 ± 0.54	0.50 ± 0.18
Fe	K	nd	nd
Ni	K	4.05 ± 4.24	0.92 ± 0.96
Cu	L	0.46 ± 0.36	0.10 ± 0.08
Zn	L	1.41 ± 0.47	0.29 ± 0.10
Total		100.00	100.00
Map_005_wholespectrum		Fitting ratio 0.7005	

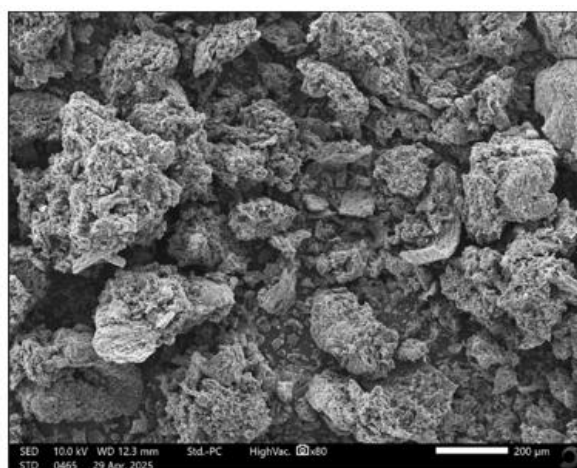
- **Composition élémentaire dominante**
 - **Carbone (C)**: 74,08% en masse (82,43% en atomes)
 - **Oxygène (O)**: 8,99% en masse (7,51% en atomes)
 - **Azote (N)**: 7,87% en masse (7,51% en atomes)

→ Structure fortement carbonée avec conservation remarquable de l'azote malgré l'activation acide.
- **Impact de l'activation à l' $H_3 PO_4$**
 - **Phosphore (P)**: 0,38% en masse → Confirme l'incorporation partielle de P dans la matrice carbonée
 - **Rapport C/O**: 8,24 (masse) | 10,98 (atomes) → Valeur élevée typique des charbons activés
- **Évolution marquée par**:
 - Augmentation de 30% de la teneur en C
 - Réduction drastique de l'O ($\div 4,8$)
 - Introduction de P et conservation de N

➤ **Après deuxième pyrolyse :**



A. Analyse MEB (20 μm)



B. Analyse MEB (200 μm)

Figure 23: Analyse MEB des noyaux des dattes après deuxième pyrolyse.

Tableau IV.20 : Analyse élémentaire (EDS) du charbon actif

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	76.41 ± 0.79	81.76 ± 0.84
N	K	7.21 ± 1.31	6.61 ± 1.20
O	K	12.77 ± 0.98	10.26 ± 0.78
Na	K	0.41 ± 0.11	0.23 ± 0.06
Mg	K	0.30 ± 0.10	0.16 ± 0.05
P	K	1.13 ± 0.21	0.47 ± 0.09
Cl	K	0.21 ± 0.12	0.08 ± 0.04
K	K	0.43 ± 0.20	0.14 ± 0.07
Ca	K	0.39 ± 0.22	0.13 ± 0.07
Fe	K	0.55 ± 0.65	0.13 ± 0.15
Ni	K	0.18 ± 1.13	0.04 ± 0.25
Cu	L	nd	nd
Zn	L	nd	nd
Total		100.00	100.00
Map_003_wholespectrum		Fitting ratio 0.6913	

- **Composition élémentaire principale**
 - **Carbone (C)** : 76,41% en masse (81,76% en atomes) → Augmentation significative par rapport à l'étape d'activation (74,08%)
 - **Oxygène (O)** : 12,77% en masse (10,26% en atomes) → Hausse modérée due à la réoxydation partielle
 - **Azote (N)** : 7,21% en masse (6,61% en atomes) → Légère diminution mais stabilité remarquable
- **Rapport C/O** : 5,98 (masse) ; 7,97 (atomes) → Indique une surface moins oxydée que le charbon activé.
- **Pureté améliorée** :
 - Disparition des métaux problématiques (Ni, Zn).
 - Teneurs résiduelles très faibles en Ca, Fe, Na.

La deuxième pyrolyse a permis d'obtenir un charbon :

- ✓ Plus carboné (76,41% C)
- ✓ À porosité développée
- ✓ Exempt de métaux lourds (Ni, Zn)
- ✓ Chimiquement stable (rapport C/O optimal)

IV.3.2. Analyse FTIR

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a permis de caractériser l'évolution des groupements fonctionnels lors des étapes clés de préparation du charbon actif : état brut, après pyrolyse, post-activation chimique et après une seconde pyrolyse. Voici une

interprétation détaillée de chaque spectre, en tenant compte des pics relevés et de leur signification chimique.

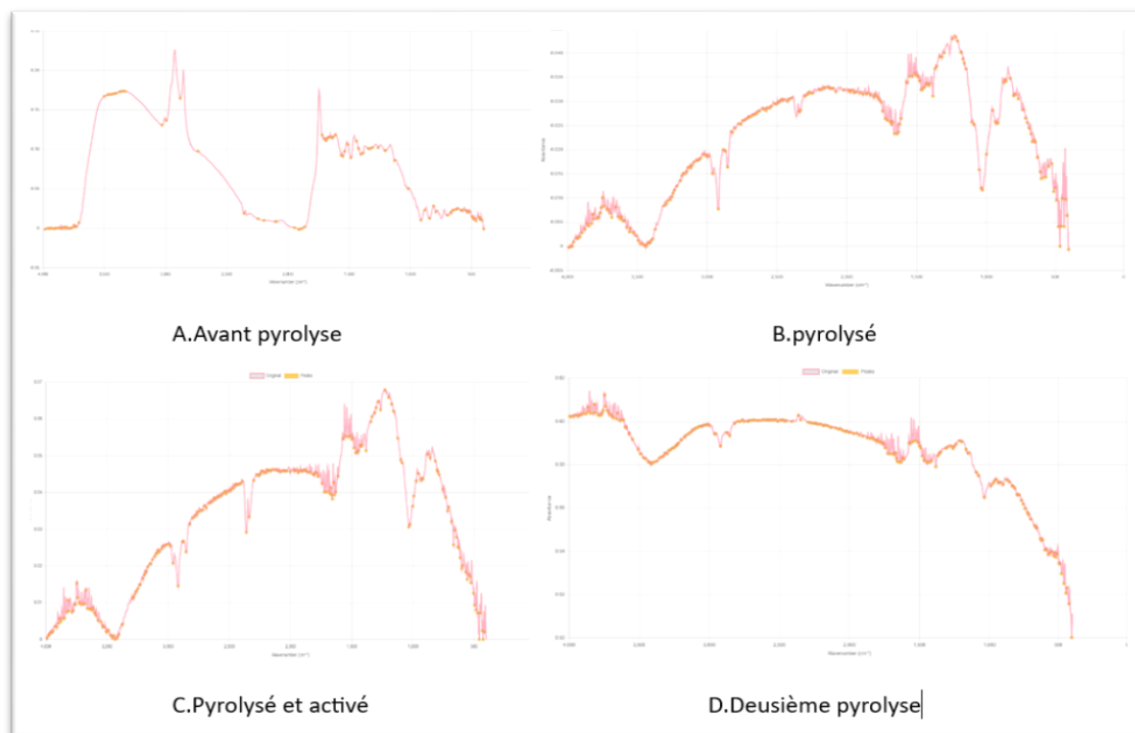


Figure 24 : Analyse FTIR du charbon actif durant les 4 étapes.

A. Avant pyrolyse

- **Pic à $3028,34\text{ cm}^{-1}$ (C=H)**

Ce pic correspond à la vibration d'élongation des liaisons C=H, typique des cycles aromatiques ou des alcènes. Sa présence indique la richesse initiale du matériau en structures aromatiques ou insaturées.

- **Pic à $1862,93\text{ cm}^{-1}$ (C-H bending, aromatic compound)**

Ce signal est associé à la déformation angulaire des liaisons C-H dans les cycles aromatiques, ce qui confirme la présence de composés aromatiques dans le noyau de datte brut.

- **Pic à $2357,91\text{ cm}^{-1}$ (O=C=O, CO₂)**

Ce pic intense est caractéristique du dioxyde de carbone, probablement adsorbé à la surface ou présent sous forme de carbonate. Cela peut traduire une certaine activité de surface et la présence de groupes carbonylés ou carboxyliques.

B. Après pyrolyse

- **Pic à $1182,52\text{ cm}^{-1}$ (C-O)**

L'apparition ou le renforcement de ce pic indique la formation de nouveaux groupes éther ou alcool (C-O), souvent issus de la décomposition thermique de la matière organique.

- **Pic à $3026,91\text{ cm}^{-1}$ (C=CH)**

Ce pic, similaire à celui observé avant pyrolyse, montre que certaines structures

insaturées (alcènes ou aromatiques) persistent après la pyrolyse, bien que leur intensité puisse varier.

- **Pic à $1051,29\text{ cm}^{-1}$ (C-O)**

Ce signal large et intense témoigne d'une importante quantité de groupes C-O, probablement issus de la formation de fonctions alcool, phénol ou éther lors de la pyrolyse. Cela traduit l'apparition de nouveaux sites polaires favorables à l'adsorption.

C. Pyrolyse et activation

- **Pic à $1265,25\text{ cm}^{-1}$ (C-H, strong)**

Ce pic fort indique la présence de groupes méthyle ou méthylène, résultant de la fragmentation de chaînes carbonées lors de l'activation.

- **Pic à $1648,97\text{ cm}^{-1}$ (C=C, medium)**

Ce signal est caractéristique des doubles liaisons carbone-carbone (C=C), typiques des structures aromatiques ou des alcènes, ce qui suggère une certaine stabilité des cycles aromatiques après activation.

- **Pic à $1173,96\text{ cm}^{-1}$ (C-O, medium)**

La persistance de ce pic confirme la présence continue de groupes oxygénés (alcool, éther, phénol), essentiels pour l'hydrophilie et la réactivité de surface du charbon actif.

D. Deuxième pyrolyse

- **Pic à 902 cm^{-1} (C=CH₂)**

Ce pic intense correspond à la vibration des groupements vinyl (C=CH₂), indiquant la formation de structures insaturées spécifiques lors de la seconde pyrolyse.

- **Pic à $1260,98\text{ cm}^{-1}$ (C-H)**

La forte intensité de ce pic montre une proportion importante de groupes méthyle/méthylène, témoignant d'une modification de la structure carbonée.

- **Pic à $3021,21\text{ cm}^{-1}$ (C=CH)**

Ce pic, déjà observé précédemment, confirme la persistance de liaisons insaturées dans le matériau final.

- **Pic à $2347,92\text{ cm}^{-1}$ (O=C=O, CO₂)**

La réapparition d'un pic intense de CO₂ suggère une activation de surface importante, avec la présence de groupes carbonyles et la capacité du charbon à adsorber ou retenir du dioxyde de carbone.

❖ Interprétation globale

L'évolution des spectres FTIR au fil des étapes de traitement met en évidence :

- **La transformation progressive des groupes fonctionnels** : Disparition partielle des fonctions aromatiques et apparition de nouveaux groupes oxygénés (C-O, CO₂), essentiels pour l'adsorption.
- **Le maintien de structures insaturées** : Les pics C=CH et C=C persistent, traduisant une stabilité des cycles aromatiques, favorable à la résistance chimique du charbon actif.

- **L'enrichissement en groupes polaires** : L'augmentation des pics C-O et CO₂ après activation et deuxième pyrolyse montre la création de sites actifs pour l'adsorption de polluants, en particulier les molécules polaires ou ioniques.

Tableau IV.21 : Tableau récapitulatif de l'évolution structurale du charbon actif.

Étape	Groupes caractéristiques	Observation principale
Avant pyrolyse	C=H, C-H (aromatique), O=C=O	Présence de structures aromatiques et de groupes oxygénés variés
Pyrolyse	C-O, C=CH	Dégradation des impuretés, formation de noyaux aromatiques
Pyrolyse et activation	C-H, C=C, C-O	Introduction de fonctions oxygénées, surface plus polaire
Deuxième pyrolyse	C=CH ₂ , C-H, C=CH, O=C=O	Stabilisation, maintien des groupes actifs, enrichissement carboné

L'analyse FTIR de votre charbon actif issu des noyaux de dattes montre une évolution structurale marquée par la disparition progressive de certains groupes initiaux et la formation de nouveaux sites fonctionnels, principalement oxygénés.

Ces modifications confèrent au matériau une surface active et réactive, adaptée à l'adsorption de divers polluants, et justifient pleinement l'intérêt de la valorisation de cette biomasse pour la production de charbons actifs performants.

IV.3.3. L'analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse gravimétrique thermique (AGT), ou thermogravimétrie (TGA), permet d'étudier la stabilité thermique et la composition des matériaux en suivant la perte de masse en fonction de la température. Les quatre diagrammes présentés correspondent aux différentes étapes de préparation du charbon actif : avant pyrolyse, après pyrolyse, après activation, et après une seconde pyrolyse. Voici une analyse détaillée et comparative de ces courbes.

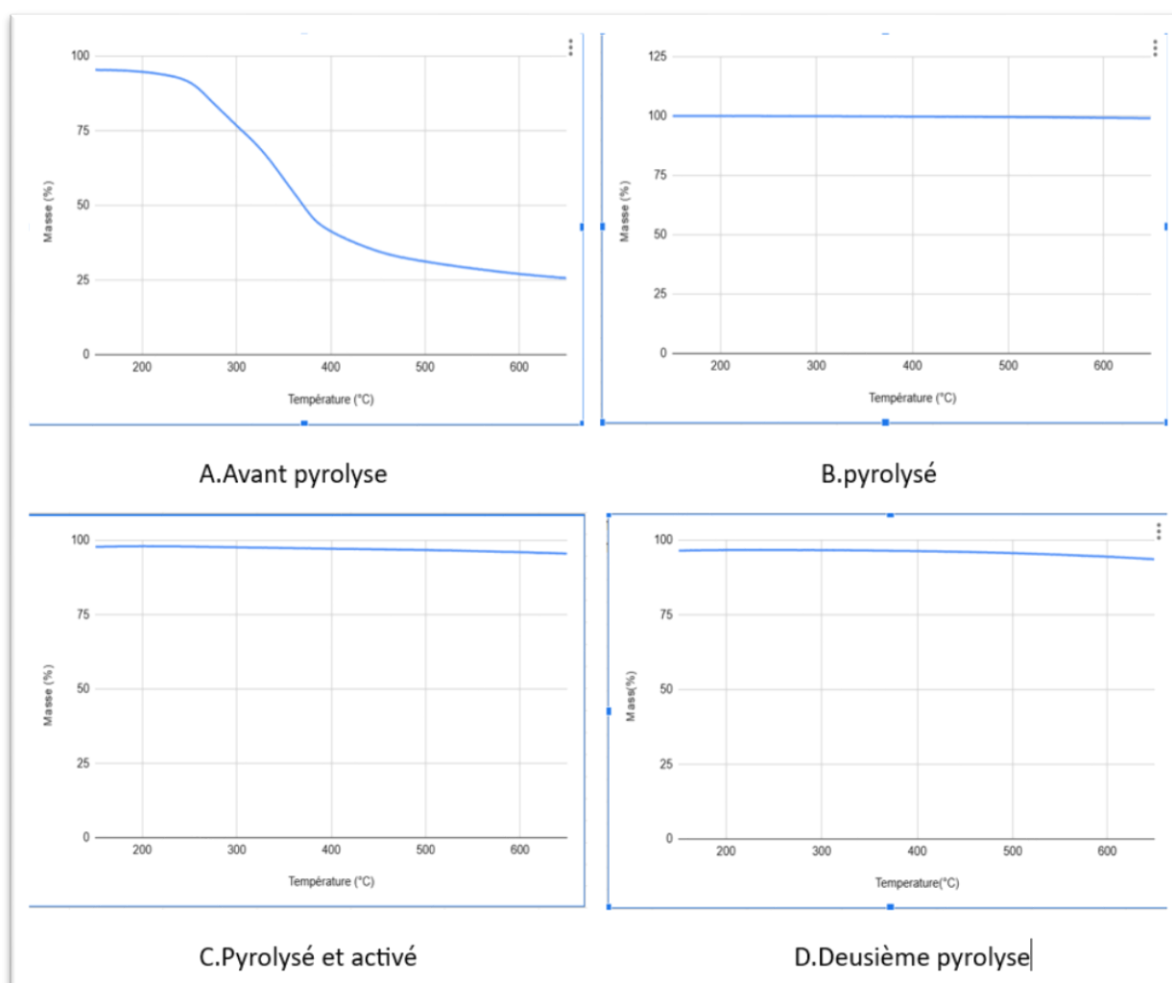


Figure 25 : ATG du charbon actif durant les 4 étapes.

A. Avant pyrolyse

- **Description du diagramme :**

La courbe montre une perte de masse importante, débutant dès les basses températures (~100 °C) et se poursuivant de façon marquée jusqu'à environ 600 °C. La masse résiduelle finale est nettement inférieure à la masse initiale.

- **Interprétation :**

Cette perte de masse traduit la décomposition progressive des constituants organiques du noyau de datte brut :

- Élimination de l'eau libre et des composés volatils (<150 °C).
- Dégradation des hémicelluloses et de la cellulose (200–400 °C).
- Décomposition de la lignine et carbonisation (400–600 °C).

La forte diminution de masse confirme la richesse initiale en matière organique et la présence de nombreux composés volatils.

B. Pyrolyse

- **Description du diagramme :**

La courbe reste quasiment plate, avec une masse qui demeure très proche de 100 % sur toute la plage de température.

- **Interprétation :**

Cela indique que le matériau pyrolysé est thermiquement très stable. Les composés volatils et thermolabiles ont déjà été éliminés lors de la première pyrolyse. Il ne reste essentiellement que la fraction carbonée, peu sujette à la dégradation thermique jusqu'à 600 °C.

Cette stabilité est caractéristique d'un charbon partiellement graphitisé ou fortement aromatisé.

C. Pyrolyse et activation

- **Description du diagramme :**

La courbe présente une très légère décroissance de la masse, mais la perte reste minime sur toute la gamme de température.

- **Interprétation :**

Après activation, le matériau conserve une excellente stabilité thermique. La faible perte de masse peut être attribuée à la désorption de quelques groupes fonctionnels de surface (groupes oxygénés introduits lors de l'activation) ou à la libération de traces de gaz piégés.

Cela indique que l'activation n'a pas fragilisé la structure carbonée, tout en introduisant des sites actifs sans compromettre la stabilité globale.

D. Deuxième pyrolyse

- **Description du diagramme :**

La courbe est très similaire à celle de l'échantillon activé : la masse reste stable, avec une très faible diminution.

- **Interprétation :**

La seconde pyrolyse permet de stabiliser encore davantage la structure, en éliminant les éventuels résidus non carbonés ou groupes instables restants. Le matériau final est hautement carboné, thermiquement stable, et prêt pour des applications d'adsorption exigeant une résistance thermique élevée.

Tableau IV.22 : Comparaison et synthèse

Étape	Perte de masse	Stabilité thermique	Interprétation principale
Avant pyrolyse	Importante	Faible	Présence de matière organique et de volatils
Pyrolyse	Nulle	Très élevée	Structure carbonée stable, absence de composés thermolabiles
Pyrolyse et activation	Très faible	Très élevée	Stabilité maintenue, introduction de sites actifs de surface
Deuxième pyrolyse	Très faible	Très élevée	Structure stabilisée, matériau hautement purifié et carboné

L'évolution des courbes ATG montre clairement la transformation du noyau de datte brut, riche en composés organiques volatils, vers un charbon actif thermiquement stable et purifié.

- **Avant pyrolyse**, la perte de masse est majeure, révélant l'élimination de l'eau, des volatils et la décomposition des polymères naturels.
- **Après pyrolyse**, la stabilité thermique est atteinte : la structure carbonée résiste à la chaleur.

- **Après activation et seconde pyrolyse**, la stabilité est conservée, signe d'une structure optimisée pour l'adsorption, sans fragilisation.

Cette évolution confirme la réussite du procédé de préparation et la qualité du charbon actif obtenu, prêt à être valorisé dans des applications de dépollution ou de filtration nécessitant une grande stabilité thermique et chimique.

IV.4. Comparaison entre le charbon actif extrait du marc de café et celui des noyaux de dattes

IV.4.1. Morphologie et structure poreuse (analyse MEB)

➤ **Marc de café :**

- Surface hétérogène présentant :
- Cavités irrégulières et aspérités
- Mélange de micropores (<2nm) et mésopores (2-50nm)
- Zones lisses interrompant la continuité poreuse
- Porosité globalement moins développée que les noyaux de dattes

➤ **Noyaux de dattes :**

- Architecture poreuse remarquablement homogène
- Réseau interconnecté de pores de différentes tailles
- Abondance de mésopores bien répartis
- Surface spécifique plus élevée et mieux organisée

→ **Avantage clair :** Noyaux de dattes pour leur structure poreuse mieux organisée

IV.4.2. Groupements fonctionnels (analyse FTIR)

- **Marc de café :**
 - Présence initiale de groupes C-Cl, C≡N, et benzéniques.
 - Après pyrolyse et activation, apparition de groupes oxygénés (O=C=O) et maintien de structures aromatiques (C=CH).
 - Deuxième pyrolyse : stabilisation des groupes carbonylés et présence de structures insaturées (C=CH₂).
- **Noyaux de dattes :**
 - Groupes initiaux : C=H aromatiques et O=C=O.
 - Après pyrolyse : apparition de groupes C-O et persistance des structures insaturées (C=CH).
 - Activation et deuxième pyrolyse : enrichissement en groupes oxygénés (C-O, O=C=O) et présence de groupements vinyliques (C=CH₂).

Les deux matériaux développent des groupes fonctionnels oxygénés essentiels pour l'adsorption, mais les noyaux de dattes montrent une évolution plus marquée vers des structures polaires, ce qui peut améliorer leur capacité d'adsorption pour les polluants polaires.

IV.4.3. Stabilité thermique (analyse ATG)

- **Marc de café :**
 - Perte de masse importante avant pyrolyse (70 %), due à la décomposition de la matière organique.
 - Après pyrolyse et activation, stabilité thermique élevée avec des pertes minimales (< 5 %).
- **Noyaux de dattes :**
 - Perte de masse majeure avant pyrolyse, similaire au marc de café.
 - Après pyrolyse et activation, stabilité thermique très élevée, avec des pertes négligeables (< 5 %).

Les deux charbons actifs présentent une excellente stabilité thermique après traitement, mais les noyaux de dattes semblent légèrement plus stables après activation.

IV.4.4. Propriétés texturales (analyse BET)

Echantillon	a (m ² /g)	Vm (cm ³ (STP)/g)
MARC DU CAF PYRO + ACT 40	2,73E-01	6,27E-02
MARC DU CAF 2emePYRO	4,72E-01	0,11
MARC DU CAF PYRO	1,52E-02	3,50E-03
Noy DES DATTES 2EME PYRO	1,59E+01	3,65
Noy DES DATTES PYRO	2,073	0,476
Noy DES DATTES PYRO act 40	1,186	0,2726

- **Marc de café :**
 - **Pyrolyse seule :**
 - Surface spécifique très faible (0,0152 m²/g)
 - Microporosité limitée (0,0035 cm³/g)
 - Nécessite impérativement une activation chimique pour développer sa porosité
 - **Après activation chimique (H₃PO₄ 40%) :**
 - Augmentation spectaculaire de la surface spécifique (27,3 m²/g)
 - Microporosité modérée (0,0627 cm³/g)
 - Développement principalement de mésopores
 - **Atout :** Adapté aux molécules de taille moyenne (colorants, composés organiques).
- **Noyaux de dattes :**
 - **Double pyrolyse sans activation :**
 - Surface spécifique naturellement élevée (15,9 m²/g)

- Microporosité exceptionnelle (3,65 cm³/g)
- Structure poreuse auto-développée par traitement thermique seul
- **Atout** : Idéal pour l'adsorption de petites molécules (gaz, métaux lourds)
- **Après activation chimique** :
 - Réduction des performances (1,186 m²/g)
 - Suggestif d'un surdosage de l'agent activant

→**Synthèse** :

Les noyaux de dattes présentent une microporosité intrinsèque supérieure ne nécessitant pas d'activation chimique, tandis que le marc de café dépend crucialement de l'activation pour atteindre des performances compétitives.

Tableau IV.23 : Synthèse des performances

Critère	Marc de café	Noyaux de dattes
Structure poreuse	Bonne, mais moins homogène	Excellente, très homogène et interconnectée
Groupements fonctionnels	Riches en C=CH et O=C=O	Plus riches en C-O et O=C=O
Stabilité thermique	Très bonne après traitement	Excellente après traitement
Potentiel d'adsorption	Adapté aux polluants aromatiques	Adapté aux polluants polaires et variés
Surface spécifique	0,472 (Très faible)	15,9 (Bonne porosité)

IV.5. Conclusion

Le charbon actif issu des **noyaux de dattes** se distingue comme le meilleur choix pour les applications d'adsorption, en raison de :

1. Sa **structure poreuse plus développée et homogène**, favorable à une adsorption efficace de molécules variées.
2. Sa **surface riche en groupes oxygénés**, idéale pour l'adsorption de polluants polaires.
3. Sa **stabilité thermique légèrement supérieure**, garantissant une durabilité accrue dans des conditions exigeantes.

Cependant, le charbon actif de marc de café reste un matériau performant, notamment pour l'adsorption de composés aromatiques, et pourrait être privilégié dans des contextes où sa disponibilité est plus grande ou son coût de production plus faible.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

La problématique de la gestion des déchets organiques constitue un défi majeur dans le contexte environnemental actuel, notamment dans les pays à forte production de résidus agroalimentaires. Ce travail s'est inscrit dans une démarche de valorisation de deux biomasses abondantes en Algérie : **le marc de café** et **les noyaux de dattes**, considérés généralement comme des déchets sans utilité, mais qui présentent un potentiel intéressant pour la production de **charbon actif** à des fins industrielles ou environnementales.

À travers un protocole expérimental basé sur des étapes de **pyrolyse, d'activation thermique ou chimique**, et de **post-traitements thermiques**, des charbons actifs ont été préparés en laboratoire à partir de ces deux résidus. L'ensemble des matériaux obtenus a fait l'objet d'analyses physico-chimiques approfondies afin de caractériser leur structure, leur stabilité thermique, leur morphologie, ainsi que leur capacité d'adsorption potentielle.

Les résultats obtenus à travers la **spectroscopie FTIR** ont permis de suivre l'évolution des **groupes fonctionnels** présents sur la surface des échantillons tout au long du processus. On a observé la disparition progressive des groupes d'origine (hydroxyles, nitriles, halogènes) au profit de **groupes aromatiques et carbonylés**, caractéristiques d'un matériau carboné fonctionnalisé.

L'**analyse thermogravimétrique (ATG)** a révélé une **stabilité thermique accrue** des échantillons après pyrolyse et activation, traduisant la réussite des étapes de carbonisation, avec une perte de masse très réduite au-delà de 300 °C, et confirmant l'élimination des fractions volatiles.

La **microscopie électronique à balayage (MEB)** a mis en évidence l'apparition de **structures poreuses bien définies** après activation, avec des surfaces plus ouvertes et irrégulières, favorables à l'adsorption.

L'analyse **BET** a permis de mesurer une **surface spécifique significative**, accompagnée d'une **bonne porosité globale**, en particulier chez les échantillons activés chimiquement, confirmant leur aptitude à l'adsorption de molécules organiques ou inorganiques.

Les résultats de l'analyse **DRX** ont été entamés mais ne sont pas encore disponibles au moment de la rédaction. Cette analyse, une fois finalisée, viendra compléter la compréhension de la structure cristalline ou amorphe des matériaux produits.

Il est important de souligner que **le charbon actif préparé à partir des noyaux de dattes a montré les meilleures performances globales**, que ce soit en termes de stabilité, de structure poreuse ou de potentiel adsorbant, comparé à celui issu du marc de café. De plus, **l'activation chimique préalable à la pyrolyse** – notamment celle du marc de café par le chlorure d'hydrogène (HCl) – a permis une amélioration significative des propriétés du charbon, en augmentant la surface disponible et en facilitant le développement de la porosité.

Enfin, en ce qui concerne le **rendement en masse**, le processus de transformation appliqué a abouti à un rendement moyen de **9,3 %**, ce qui signifie que 100 grammes de biomasse brute ont permis de produire environ **9,3 grammes de charbon actif**. Ce rendement est cohérent avec les valeurs attendues pour des procédés de carbonisation à haute température.

De manière globale, ce travail expérimental a démontré la **faisabilité technique et scientifique de la valorisation du marc de café et des noyaux de dattes** pour la production de charbon actif. Les résultats confirment que les matériaux obtenus présentent des caractéristiques proches de celles des charbons actifs commerciaux, tant en termes de structure que de réactivité de surface. Ils peuvent donc être envisagés pour des **applications**

CONCLUSION GÉNÉRALE

environnementales telles que le traitement des eaux, l'adsorption de polluants ou de composés organiques volatils.

Cette recherche ouvre également plusieurs perspectives d'optimisation. Il serait pertinent d'explorer **l'ajustement des paramètres de pyrolyse** (température, durée, atmosphère), ainsi que **la diminution des agents activateurs** en tenant compte des résultats obtenus dans cette étude, qui montrent que **l'activation chimique préalable à la pyrolyse** (notamment avec du HCl) permet de **favoriser le développement de la porosité et l'amélioration des propriétés adsorbantes**.

En définitive, ce projet s'inscrit pleinement dans les objectifs du **développement durable**, en combinant la **gestion intelligente des déchets**, la **production locale de matériaux fonctionnels**, et la **réduction de l'impact environnemental**. Il contribue à valoriser des ressources sous-exploitées et facilement accessibles, en offrant une alternative écologique, économique et reproductible à plus grande échelle.

Références bibliographiques :

- (1) Larousse, É. *Définitions : déchet, déchets - Dictionnaire de français Larousse*. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/d%C3%A9chet/22142> (accessed 2025-05-03).
- (2) *Définitions de la terminologie réglementaire*. Agence Nationale des Déchets. <https://and.dz/base-des-connaissances/definitions/> (accessed 2025-05-03).
- (3) *Réglementation générale déchets*. https://www.ordeco.org/reglementation-generale?fbclid=IwY2xjawKEu5lleHRuA2FlbQIxMABicmlkETFsWVVFqdzk5ZHdsWjZIR1pyAR5Emgb041LTv5WV6OG6Hjy59ViaN-qbWrPPYO62pXIF7HshL-QzF1PRw2WvAw_aem_XVBDp5ToFBnrtRW1sI2K_A (accessed 2025-05-04).
- (4) *Définition de Déchet*. Actu-Environnement. https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dechet.php4 (accessed 2025-05-04).
- (5) Bertolini, G. Qu'est-ce qu'un déchet ? Le droit européen rejette l'acceptation économique. *Environ. Ingénierie Dév.* **1998**, N°12-4ème Trimestre 1998, 8201. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.906>.
- (6) Guide Dechet. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.dgdr.cnrs.fr/sst/cnps/guides/doc/dechets/guidedechets.pdf&ved=2ahUKEwj1z7zz64mNAxUFT6QEHLyOn8QFnoECCAQAQ&usg=AOvVaw3cmTRJnuprfwPnT_ffihAb (accessed 2025-05-04).
- (7) Dr. BAZRI K.E.D. Cour Univ Constantine1. <https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/becol/2022/Cours%20Pollution%20par%20les%20d%C3%A9chets.%20BAZRI.pdf> (accessed 2025-05-04).
- (8) Chapitre01_univ_msila. https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/287996/mod_resource/content/1/chapitre01.pdf (accessed 2025-05-04).
- (9) Journal Officiel. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.joradp.dz/FTP/Jo-Francais/2001/F2001077.pdf&ved=2ahUKEwj6zufd8omNAxUeVKQEHZ_ONuQQFnoECBIQBg&usg=AOvVaw1oT66NTatYjvQDnKewVa5m (accessed 2025-05-04).
- (10) Auvergne-Rhône-Alpes, D. *Classification et traçabilité des déchets*. DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. <https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/classification-et-tracabilite-des-dechets-a13138.html> (accessed 2025-05-03).
- (11) *Qu'est-ce que le Catalogue Européen des Déchets (CED) et à quoi sert-il ? – ScrapAd*. <https://scrapad.com/fr/blog/quest-ce-que-le-catalogue-europeen-des-dechets-et-a-quoi-sert-il/> (accessed 2025-05-03).
- (12) Liste de codification des déchets (Annexe II de l'article R. 541-8 du CE).
- (13) *Gestion des déchets : principes généraux | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique*. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/gestion-dechets-principes-generaux> (accessed 2025-05-03).
- (14) *Exposé gestion et valorisation des déchets*. SlideShare. <https://fr.slideshare.net/slideshow/expos-gestion-et-valorisation-des-dchets/87637804> (accessed 2025-05-04).
- (15) CLIC1000, L. *Gestion et caractérisation des déchets urbains solides*. Documents pour tous. <https://www.clicours.com/gestion-et-caracterisation-des-dechets-urbains-solides/> (accessed 2025-05-04).

- (16) *Cadre institutionnel et réglementaire*. Agence Nationale des Déchets.
<https://and.dz/presentation/cadre-institutionnel-et-reglementaire/> (accessed 2025-05-04).
- (17) *Loi n° 01-19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets*. | FAOLEX.
https://www.fao.org/faolex/results/details/fr/c/LEX-FAOC043228/?fbclid=IwY2xjawKDIQdleHRuA2FlbQIxMABicmlkETFDcXc3dWFxejViaEl1NHZNAR63FzXDb8sLqHuOE2rrIOlKL-QSdowF67UEnyvB0bnmd3gFUbOI5rF_UbHuQ_aem_9_z-8LTLVXkyWLtAZGhkXA (accessed 2025-05-04).
- (18) sabrine. *Adoption du texte de loi relatif à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets*. وزارة البيئة وجودة الحياة. <https://www.me.gov.dz/fr/adoption-du-texte-de-loi-relatif-a-la-gestion-au-contrôle-et-a-lélimination-des-dechets/> (accessed 2025-05-04).
- (19) *Les conséquences de la production de déchets sur l'écosystème*. idverde.
<https://idverde.fr/blog/les-consequences-de-la-production-de-dechets-sur-lecosysteme/> (accessed 2025-05-03).
- (20) *Comment les déchets affectent-ils l'environnement ?* | Contelogic.
<https://contelogic.com/fr/comment-les-dechets-affectent-ils-lenvironnement/> (accessed 2025-05-03).
- (21) *DGB | L'importance et l'impact de la gestion des déchets*.
https://www.green.earth/fr/waste-management?fbclid=IwY2xjawKDLW5leHRuA2FlbQIxMABicmlkETFwZHJCVDJQYlBFRHZPSjhaAR7agS_5eADhh05IcrA9JoRVueU0rY0sHDK7QmjQFBhwitQc_8LZYf0GWcy1jQ_aem_weIHVtkX6ufcCzV_a39UPQ (accessed 2025-05-03).
- (22) Pense-Lheritier, A.-M. Innovation et éco-conception pour les produits de l'industrie cosmétique. *Marché Organ.* **2013**, 17 (1), 137–147.
<https://doi.org/10.3917/maorg.017.0137>.
- (23) *Industrie cosmétique : définition, challenges et conseil*. Sneci.
<https://www.sneci.com/nos-secteurs-intervention/cosmetique/> (accessed 2025-05-14).
- (24) *Industrie pharmaceutique : définition, challenges et conseil*. Sneci.
<https://www.sneci.com/nos-secteurs-intervention/sante-et-pharmaceutique/> (accessed 2025-05-16).
- (25) *Chapitre 79 - L'industrie pharmaceutique*. <https://ilocis.org/fr/documents/ilo079.htm> (accessed 2025-05-16).
- (26) Hamdouch, A.; Depret, M.-H. Coalitions industrielles, réseaux de firmes et dynamiques de concurrence-coopération dans les secteurs en cours de globalisation : le cas de l'industrie pharmaceutique. *Cah. Maison Sci. Econ.* **2000**.
- (27) *Découvrez le secteur de la parapharmacie - Dossier complet*. https://www.go-sidely.com/post/secteur-parapharmacie?fbclid=IwY2xjawKVvV1leHRuA2FlbQIxMABicmlkETFGMmZZd0RpUGRSekp2TVZ6AR6E_EkXHqO5i06xMHm3XwLNWKP29yc-hCUU2h0N1QPS0LdGcgk_lNSssZh19w_aem_cVJb1HEL7NPR2-ozw_IN_w (accessed 2025-05-17).
- (28) *Fabrication et Contrôle de Qualité d'un Produit Parapharmaceutique : « Compresse Stérile »*. <http://dspace.univ-bouira.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/10469/1/Fabrication%20et%20contr%C3%B4le%20de%20qualit%C3%A9%20d%E2%80%99un%20produit%20pharmaceutique%20compresse%20sterile.pdf> (accessed 2025-05-17).
- (29) *Préparation et Caractérisation d'un Charbon Actif à Partir Des Tiges Des Roseaux Par Voie Chimique*, 2020. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29291/1/MIMOIRE%20Final.pdf> (accessed 2025-05-17).

- (30) *Qu'est-ce que du charbon actif?* https://www.yokodesign.fr/fr/journal/qu-est-ce-que-du-charbon-actif-.html?fbclid=IwY2xjawKV8AtleHRuA2FlbQIxMABicmlkETE3VGdQeUp3ZzRkeG50eWNwAR5fgc_Nd317FS0OcXmCaWGIG5jDaDLcjcyC1LjGOCD03qLbBzvLAFUvJcpQ_aem_H4eNmJsITh4zIMWOjwQLIA (accessed 2025-05-17).
- (31) *Matières premières pour la production et la classification des charbons actifs* ✓. Greenpower. <https://greenpower.equipment.fr/articles/matieres-premieres-pour-la-production-et-la-classification-des-charbons-actifs/> (accessed 2025-05-17).
- (32) *Durabilité et charbons actifs - fabrication, utilisation et élimination - CarboTech Gruppe*. <https://www.carbotech.de/fr/nouvelles-fr/durabilite-et-charbons-actifs-fabrication-utilisation-et-elimination/> (accessed 2025-05-18).
- (33) Abdelmalek, khaoula; Boufarou, hadjer. Préparation et caractérisation d'un charbon de marc de café, Larbi TEBESSI-Tébessa, 2020. <http://oldspace.univ-tebessa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1381> (accessed 2025-06-14).
- (34) BRIKCI NIGASSA, H. Etude physicochimique et effets biologiques de « la poudre de noyau de dattes » chez le rat Wistar, ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN, 2020. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/16547/1/BrikciNigassa.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (35) *Les bienfaits et utilisations des noyaux de dattes - L'écho Tunisien*. <https://lecho.tunisien.com/les-bienfaits-et-utilisations-des-noyaux-de-dattes/> (accessed 2025-06-14).
- (36) *Study of chemical composition of date stones for use in animal feed*. <http://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd21/5/boud21069.htm> (accessed 2025-06-14).
- (37) Boussena, Z. Etude de la composition chimique et microbiologique de noyaux de variétés de dattes Algériennes en vue de la valorisation dans le domaine alimentaire. Thesis, univ.blida1, 2012. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/6781> (accessed 2025-06-14).
- (38) Boussena, Z.; Khali, M. Extraction et composition chimique d'huile de noyaux de dattes algériennes. [Extraction and chemical composition of algerian date seeds oil]. *Nutr. Santé* **2016**, 5 (2), 100–106.
- (39) Benakli, L. Valeur nutritive de la poudre de noyaux de dattes, Université Mouloud Mammeri, 2021. <https://dspace.ummto.dz/handle/ummto/18906> (accessed 2025-06-14).
- (40) *Analyse de matériaux par DRX (Diffraction des Rayons X)*. FILAB. <https://filab.fr/nos-moyens-techniques/analyse-et-caracterisation-des-materiaux-par-diffraction-des-rayons-x-drx-en-laboratoire/filab-caracterise-vos-mineraux-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (41) *Analyse DRX en laboratoire - YesWeLab - Blog*. <https://blog.yeswelab.fr/plantes-cosmetiques/analyse-drx-laboratoire/> (accessed 2025-06-14).
- (42) *Décrypter la Cristallinité : Analyse des Poudres par DRX en Laboratoire*. <https://bplc.fr/laboratoire-dessais/services-et-prestations-des-laboratoires-dessais/prestation-de-laboratoire-de-chimie-analytique-et-organique/analyses-en-laboratoire-de-caracterisation-et-cristallinite-des-poudres-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (43) Fiche-N°6-Appareil-BET.Pdf. <https://www.fs-umi.ac.ma/wp-content/uploads/2020/10/Fiche-N%C2%B06-Appareil-BET.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (44) *Analyse de porosité BET - Département de chimie - Université de Sherbrooke*. <https://www.usherbrooke.ca/chimie/services/thermomecanique/bet> (accessed 2025-06-14).
- (1) Larousse, É. *Définitions : déchet, déchets - Dictionnaire de français Larousse*. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/d%C3%A9chet/22142> (accessed 2025-05-03).

- (2) *Définitions de la terminologie réglementaire*. Agence Nationale des Déchets. <https://and.dz/base-des-connaissances/definitions/> (accessed 2025-05-03).
- (3) *Réglementation générale déchets*. https://www.ordeco.org/reglementation-generale?fbclid=IwY2xjawKEu5lleHRuA2FlbQIxMABicmlkETFsWVfQdzk5ZHdsWjZIR1pyAR5Emgb041LTv5WV6OG6Hjy59ViaN-qbWrPPYO62pXIF7HshL-QzF1PRw2WvAw_aem_XVBDp5ToFBnrtRW1sI2K_A (accessed 2025-05-04).
- (4) *Définition de Déchet*. Actu-Environnement. https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dechet.php4 (accessed 2025-05-04).
- (5) Bertolini, G. Qu'est-ce qu'un déchet ? Le droit européen rejette l'acceptation économique. *Environ. Ingénierie Dév.* **1998**, N°12-4ème Trimestre 1998, 8201. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.906>.
- (6) Guide Dechet. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.dgdr.cnrs.fr/sst/cnps/guides/doc/dechets/guidedechets.pdf&ved=2ahUKEwj1z7zz64mNAxUFT6QEHLyOn8QFnoECCAQAQ&usg=AOvVaw3cmTRJnuprfwPnT_ffihAb (accessed 2025-05-04).
- (7) Dr. BAZRI K.E.D. Cour Univ Constantine1. <https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/becol/2022/Cours%20Pollution%20par%20les%20d%C3%A9chets.%20BAZRI.pdf> (accessed 2025-05-04).
- (8) Chapitre01_univ_msila. https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/287996/mod_resource/content/1/chapitre01.pdf (accessed 2025-05-04).
- (9) Journal Officiel. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.joradp.dz/FTP/Jo-Francais/2001/F2001077.pdf&ved=2ahUKEwj6zufd8omNAxUeVKQEHZ_ONuQQFnoECBIQBg&usg=AOvVaw1oT66NTatYjvQDnKewVa5m (accessed 2025-05-04).
- (10) Auvergne-Rhône-Alpes, D. *Classification et traçabilité des déchets*. DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. <https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/classification-et-tracabilite-des-dechets-a13138.html> (accessed 2025-05-03).
- (11) *Qu'est-ce que le Catalogue Européen des Déchets (CED) et à quoi sert-il ? – ScrapAd*. <https://scrapad.com/fr/blog/quest-ce-que-le-catalogue-europeen-des-dechets-et-a-quoi-sert-il/> (accessed 2025-05-03).
- (12) Liste de codification des déchets (Annexe II de l'article R. 541-8 du CE).
- (13) *Gestion des déchets : principes généraux | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique*. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/gestion-dechets-principes-generaux> (accessed 2025-05-03).
- (14) *Exposé gestion et valorisation des déchets*. SlideShare. <https://fr.slideshare.net/slideshow/expos-gestion-et-valorisation-des-dchets/87637804> (accessed 2025-05-04).
- (15) CLIC1000, L. *Gestion et caractérisation des déchets urbains solides*. Documents pour tous. <https://www.clicours.com/gestion-et-caracterisation-des-dechets-urbains-solides/> (accessed 2025-05-04).
- (16) *Cadre institutionnel et réglementaire*. Agence Nationale des Déchets. <https://and.dz/presentation/cadre-institutionnel-et-reglementaire/> (accessed 2025-05-04).
- (17) *Loi n° 01-19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets*. | FAOLEX. <https://www.fao.org/faolex/results/details/fr/c/LEX-FAOC043228/?fbclid=IwY2xjawKDIQdleHRuA2FlbQIxMABicmlkETFDcXc3dWFxej>

- ViaEl1NHZNAR63FzXDb8sLqHuOE2rrIOlkL-QSdowF67UEnyvB0bnmd3gFUbOll5rF_UbHuQ_aem_9_z-8LTLVXkyWLtAZGhkXA (accessed 2025-05-04).
- (18) sabrine. *Adoption du texte de loi relatif à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets*. وزارة البيئة وجودة الحياة. <https://www.me.gov.dz/fr/adoption-du-texte-de-loi-relatif-a-la-gestion-au-contrôle-et-a-lélimination-des-dechets/> (accessed 2025-05-04).
 - (19) *Les conséquences de la production de déchets sur l'écosystème*. idverde. <https://idverde.fr/blog/les-consequences-de-la-production-de-dechets-sur-lecosysteme/> (accessed 2025-05-03).
 - (20) *Comment les déchets affectent-ils l'environnement ?* | Contelogic. <https://contelogic.com/fr/comment-les-dechets-affectent-ils-lenvironnement/> (accessed 2025-05-03).
 - (21) DGB | *L'importance et l'impact de la gestion des déchets*. https://www.green.earth/fr/waste-management?fbclid=IwY2xjawKDLW5leHRuA2FlbQIxMABicmlkETfWZHJCVDJQYlBFRHZPSjhaAR7agS_5eADhh05IcrA9JoRVueU0rY0sHDK7QmjQFBhwtQc_8LZYf0GWcy1jQ_aem_weIHVtkX6ufcCzV_a39UPQ (accessed 2025-05-03).
 - (22) Pense-Lheritier, A.-M. Innovation et éco-conception pour les produits de l'industrie cosmétique. *Marché Organ.* **2013**, 17 (1), 137–147. <https://doi.org/10.3917/maorg.017.0137>.
 - (23) *Industrie cosmétique : définition, challenges et conseil*. Sneci. <https://www.sneci.com/nos-secteurs-intervention/cosmetique/> (accessed 2025-05-14).
 - (24) *Industrie pharmaceutique : définition, challenges et conseil*. Sneci. <https://www.sneci.com/nos-secteurs-intervention/sante-et-pharmaceutique/> (accessed 2025-05-16).
 - (25) *Chapitre 79 - L'industrie pharmaceutique*. <https://ilocis.org/fr/documents/ilo079.htm> (accessed 2025-05-16).
 - (26) Hamdouch, A.; Depret, M.-H. Coalitions industrielles, réseaux de firmes et dynamiques de concurrence-coopération dans les secteurs en cours de globalisation : le cas de l'industrie pharmaceutique. *Cah. Maison Sci. Econ.* **2000**.
 - (27) *Découvrez le secteur de la parapharmacie - Dossier complet*. https://www.go-sidely.com/post/secteur-parapharmacie?fbclid=IwY2xjawKVvV1leHRuA2FlbQIxMABicmlkETFGMmZZd0RpUGRSekp2TVZ6AR6E_EkXHqO5i06xMHm3XwLNWKP29yc-hCUU2h0N1QPS0LdGcgk_INSssZh19w_aem_cVJb1HEL7NPR2-ozw_IN_w (accessed 2025-05-17).
 - (28) Fabrication et Contrôle de Qualité d'un Produit Parapharmaceutique : « Compresse Stérile ». <http://dspace.univ-bouira.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/10469/1/Fabrication%20et%20contr%C3%B4le%20de%20qualit%C3%A9%20d%E2%80%99un%20produit%20pharmaceutique%20compresse%20sterile.pdf> (accessed 2025-05-17).
 - (29) Préparation et Caractérisation d'un Charbon Actif à Partir Des Tiges Des Roseaux Par Voie Chimique, 2020. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29291/1/MIMOIRE%20Final.pdf> (accessed 2025-05-17).
 - (30) *Qu'est-ce que du charbon actif?* https://www.yokodesign.fr/fr/journal/qu-est-ce-que-du-charbon-actif-.html?fbclid=IwY2xjawKV8AtleHRuA2FlbQIxMABicmlkETE3VGdQeUp3ZzRkeG50eWNwAR5fgc_Nd317FS0OcXmCaWGlG5jDaDLcjcyC1LjGOCD03qLbBzvLAfFUvJcpQ_aem_H4eNmJsITh4zIMWOjwQLIA (accessed 2025-05-17).

- (31) *Matières premières pour la production et la classification des charbons actifs* ✓. Greenpower. <https://greenpower.equipment/fr/articles/matieres-premieres-pour-la-production-et-la-classification-des-charbons-actifs/> (accessed 2025-05-17).
- (32) *Durabilité et charbons actifs - fabrication, utilisation et élimination - CarboTech Gruppe*. <https://www.carbotech.de/fr/nouvelles-fr/durabilite-et-charbons-actifs-fabrication-utilisation-et-elimination/> (accessed 2025-05-18).
- (33) Abdelmalek, khaoula; Boufarou, hadjer. Préparation et caractérisation d'un charbon de marc de café, Larbi TEBESSI-Tébessa, 2020. <http://oldspace.univ-tebessa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1381> (accessed 2025-06-14).
- (34) BRIKCI NIGASSA, H. Etude physicochimique et effets biologiques de « la poudre de noyau de dattes » chez le rat Wistar, ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN, 2020. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/16547/1/BrikciNigassa.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (35) *Les bienfaits et utilisations des noyaux de dattes - L'écho Tunisien*. <https://lecho.tunisien.com/les-bienfaits-et-utilisations-des-noyaux-de-dattes/> (accessed 2025-06-14).
- (36) *Study of chemical composition of date stones for use in animal feed*. <http://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd21/5/boud21069.htm> (accessed 2025-06-14).
- (37) Boussena, Z. Etude de la composition chimique et microbiologique de noyaux de variétés de dattes Algériennes en vue de la valorisation dans le domaine alimentaire. Thesis, univ.blida1, 2012. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/6781> (accessed 2025-06-14).
- (38) Boussena, Z.; Khali, M. Extraction et composition chimique d'huile de noyaux de dattes algériennes. [Extraction and chemical composition of algerian date seeds oil]. *Nutr. Santé* **2016**, 5 (2), 100–106.
- (39) Benakli, L. Valeur nutritive de la poudre de noyaux de dattes, Université Mouloud Mammeri, 2021. <https://dspace.ummto.dz/handle/ummto/18906> (accessed 2025-06-14).
- (40) *Analyse de matériaux par DRX (Diffraction des Rayons X)*. FILAB. <https://filab.fr/nos-moyens-techniques/analyse-et-caracterisation-des-materiaux-par-diffraction-des-rayons-x-drx-en-laboratoire/filab-caracterise-vos-mineraux-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (41) *Analyse DRX en laboratoire - YesWeLab - Blog*. <https://blog.yeswelab.fr/plantes-cosmetiques/analyse-drx-laboratoire/> (accessed 2025-06-14).
- (42) *Décrypter la Cristallinité : Analyse des Poudres par DRX en Laboratoire*. <https://bplc.fr/laboratoire-dessais/services-et-prestations-des-laboratoires-dessais/prestation-de-laboratoire-de-chimie-analytique-et-organique/analyses-en-laboratoire-de-caracterisation-et-cristallinite-des-poudres-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (43) Fiche-N°6-Appareil-BET.Pdf. <https://www.fs-umi.ac.ma/wp-content/uploads/2020/10/Fiche-N%C2%B06-Appareil-BET.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (44) *Analyse de porosité BET - Département de chimie - Université de Sherbrooke*. <https://www.usherbrooke.ca/chimie/services/thermomecanique/bet> (accessed 2025-06-14).
- (33) Abdelmalek, khaoula; Boufarou, hadjer. Préparation et caractérisation d'un charbon de marc de café, Larbi TEBESSI-Tébessa, 2020. <http://oldspace.univ-tebessa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1381> (accessed 2025-06-14).
- (34) BRIKCI NIGASSA, H. Etude physicochimique et effets biologiques de « la poudre de noyau de dattes » chez le rat Wistar, ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN, 2020. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/16547/1/BrikciNigassa.pdf> (accessed 2025-06-14).

- (35) *Les bienfaits et utilisations des noyaux de dattes - L'écho Tunisien.*
<https://lecho.tunisien.com/les-bienfaits-et-utilisations-des-noyaux-de-dattes/> (accessed 2025-06-14).
- (36) *Study of chemical composition of date stones for use in animal feed.*
<http://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd21/5/boud21069.htm> (accessed 2025-06-14).
- (37) Boussena, Z. Etude de la composition chimique et microbiologique de noyaux de variétés de dattes Algériennes en vue de la valorisation dans le domaine alimentaire. Thesis, univ.blida1, 2012. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/6781> (accessed 2025-06-14).
- (38) Boussena, Z.; Khali, M. Extraction et composition chimique d'huile de noyaux de dattes algériennes. [Extraction and chemical composition of algerian date seeds oil]. *Nutr. Santé* **2016**, 5 (2), 100–106.
- (39) Benakli, L. Valeur nutritive de la poudre de noyaux de dattes, Université Mouloud Mammeri, 2021. <https://dspace.ummo.dz/handle/ummo/18906> (accessed 2025-06-14).
- (40) *Analyse de matériaux par DRX (Diffraction des Rayons X).* FILAB. <https://filab.fr/nos-moyens-techniques/analyse-et-caracterisation-des-materiaux-par-diffraction-des-rayons-x-drx-en-laboratoire/filab-caracterise-vos-mineraux-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (41) *Analyse DRX en laboratoire - YesWeLab - Blog.* <https://blog.yeswelab.fr/plantes-cosmetiques/analyse-drx-laboratoire/> (accessed 2025-06-14).
- (42) *Décrypter la Cristallinité : Analyse des Poudres par DRX en Laboratoire.*
<https://bplc.fr/laboratoire-dessais/services-et-prestations-des-laboratoires-dessais/prestation-de-laboratoire-de-chimie-analytique-et-organique/analyses-en-laboratoire-de-caracterisation-et-cristallinite-des-poudres-par-drx/> (accessed 2025-06-14).
- (43) Fiche-N°6-Appareil-BET.Pdf. <https://www.fs-umi.ac.ma/wp-content/uploads/2020/10/Fiche-N%C2%B06-Appareil-BET.pdf> (accessed 2025-06-14).
- (44) *Analyse de porosité BET - Département de chimie - Université de Sherbrooke.*
<https://www.usherbrooke.ca/chimie/services/thermomecanique/bet> (accessed 2025-06-14).

