



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 الشهيد حمّة لخضر الوادي

Université Echahid Hamma Lakdhar EL-OUED

كلية العلوم الطبيعية والحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم البيولوجيا الخلوية والجزيئية

Département de Biologie Cellulaire et Moléculaire

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Sciences biologiques

Domaine : Sciences de la nature et de la vie

Filière : science biologique

Spécialité: Biochimie appliquée

Afin d'obtenir un master conformément aux dispositions de l'arrêté ministériel algérien

n° 1275.

THÈME

**Développement d'un système de filtration des eaux usées destinées
à l'irrigation agricole utilisant des nanoparticules issues des
noyaux de dattes.**

Présenté Par :

M^{elle} : MAOUCHE Nour Elimane

M^{elle} : TEBBAL Nour Elimane

M^{elle} : ZIDI Sara

Devant le jury composé de :

Président	Dr. Khelef Yahia	Université d'El Oued.
Examinatrice	Dr. Guemmouda Messaouda	Université d'El Oued.
Promoteur	Dr. Ghania Ahmed	Université d'El Oued.
Représentant de incubateur	Dr. Adel Redouane	Université d'El Oued.
Partenaires économiques	Mr. Benni Mohamed Amine	Université d'El Oued.

Année universitaire: 2025/2026

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والذي وفقني لإتمام هذا العمل بعد رحلة من الاجتهاد والصبر والأمل.

أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع إلى من كانت أول مدرسة في حياتي، وأعظم نعمة أنعم الله بها عليّ، إلى من جعلت سعادتي غلبتها، ونجاحي حلماً، ودعاءها رفيقي في كل خطوة من خطوات حياتي...

إلى أمي الحبيبة

إليك يا من صنعت من تعبك راحتي، ومن صبرك قوتي، ومن حبك حياةً تفيض بالأمان والطمأنينة.

إليك يا من كنت النور الذي يبدر عتمة الطريق، والقلب الذي احتواني في لحظات ضعفي قبل قوتي، واليد التي امتدت إليّ بالعون دون انتظار مقابل.

مهما كتبت من كلمات، ومهما نسجت من عبارات الشكر والثناء، فلن أوفيك حقك، فأنت أصل كل نجاح أعيشه، وسر كل إنجاز أحققه.

أسأل الله أن يحفظك ويبارك في عمرك، وأن يجعلني دائماً مصداً فخر وسعادة لك.

إلى أبي العزيز

إلى من علمني أن الطموح لا حدود له، وأن الإرادة تصنع المستحيل، إلى من كان سنداً وعموداً ودعامةً ثابتةً في مسيرتي، إلى من منحي ثقة ودعمه وتشجيعه في كل

مرحلة من مراحل حياتي.

أهديك هذا العمل عرفاناً بحميتك، ووفاءً لما غرسته في نفسي من قيم العزيمة والكفاح.

إلى أختي العزيزة ياسمين،

رفيقة القلب وبهجة الأيام، شكراً لوجودك الدائم إلى جانبي، ولدعمك وتشجيعك الذي كان خير سند لي في مسيرتي.

وإلى إخوتي محمد طه وضياء الدين،

أهديكم هذا الإنجاز عروناً ومحبةً وامتناناً، راجيةً أن أكون دائماً مصداً فخر لكم كما كنتم لي مصداً قوةً وعزيمةً.

إلى الأصدقاء والأساتذة الذين أضاءوا طريقتي بعلمهم ودعمهم، أهدي هذا العمل تقديراً لمكانتهم وأثرهم طيباً سيبقى في الذاكرة والوجدان.

معوش نور الإيمان

الإهداء

وأخرد عواهم أن الحمد لله رب العالمين

بعد تعب ومشقة في سبيل الحلم والعلم بأننا أقف على عتبة تحرجي أرفع

قمتي بكل فخر وإمتنانا على البدء والختام، الحمد لله الذي وفقني لإتمام هذه المسيرة العلمية ، ويسر لي طريق النجاح ، والصلاة والسلام على سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم .

بكل حب أهدي ثمرة نجاحي وتحرجي إلى نفسي أولا ثم إلى من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحا العلم إلى من بابني وبين لي صواب ، فله كل الشكر والتقدير والدي العزيز.

إلى صاحبة القلب الكبير والحنان الدفين ، التي كانت بدعائها ومساندتها مصدرا قوتي وألمي في كل مراحل حياتي ، إلى من جعل الله الجته تحت أقدامها فجزاها الله عني خير الجزاء ، وأداما نعمته في حياتي أُمي الغالية .

إلى اللذان شاركا في تفاصيل هذه الرحلة وكانا خير سند وعون في أوقات التعب والتجدي ، إلى من شد بهما عضدي وزرعا الثقة والإصرار بداخلي أخوي (إبراهيم ومحمد البراء)

إلى اللتان أضفتا إلى حياتي الفرح والدعم والمحبة ، إلى من كان لكلماتهما المشجعة أثر كبير في مواصلة الطريق وتحقيق هذا الإنجاز أختائي (رواف ورواسي).

إلى من كان لهم الفضل والدعم في كل خطوة من مسيرتي ، وإلى كل من شاركني لحظات التعب

والأمل حتى وصلت إلى هذا النجاح (أجدادي وجداتي ، خالاتي وعماتي كل باسمه وعظيم شأنه) حفظكم الله وأداكم مصدرا فخر وطمأنينة في حياتي.

إلى من علمني أن الحياة من دون ترابط وحب وتعاون لا تساوي شيئا . صديقاتي (عمير ، سعيده ، سليمه ، سارة ، إكرام).

إليكم جميعا أهدي هذا التخرج ، فهو ثمرة وعلمكم ومحببتكم ،

وأخيرا من قال أنا لها نالها "وأنا لها رغما عنها أتيت بها

ما كنت لأفعل لولا توفيقا من الله . فالحمد لله الذي ماتيقنت به خيرا وأملا بالله واغرقتني سرورا وفرحا ينسيني مشقتي

نور الإيمان طبال.

الإهداء

ان الحمد لله تعالى نحمده ونستعينه ونستغفره ونعوذ بالله من شرور أنفسنا وسيئات أعمالنا من يهده الله فلا مضل له ومن يضلله فلا

هادي له

أهدي ثمرة هذا الإنجاز إلى نفسي، عرفانًا بما بذلته من جهد وثبات في سبيل بلوغ هذا الهدف.

إلى من غاب عني جسدا وحضر في قلبي دوما واحمل اسمه بكل فخر إلى والدي زيدي عبد القادر المراحل رحمه الله اهدي هذا المشروع

إلى روحه الطاهرة

إلى أُمي الحبيبة، من كانت ولا تزال مصدر قوتي ودعائي ونجائي، شكراً لصبرك ودعمك اللامحدود، حفظك الله لي وأطال في

عمرك.

إلى إخوتي: أيمن، ونام، وبسمة، أنتم سندي في هذه الحياة ومصدر فرحتي.

إلى كل عائلة زيدي (وخاصة أبناء عمي) التي كانت دائما مصدر دعم واعتزاز لا ينقطع

إلى جميع صديقاتي، من سطيف وجامعة والمغير وواد سوف الذين رافقوني في هذه المسيرة، وكانوا خير عون في لحظات التعب

والنجاح

وإلى كل من ساندني من قريب أو بعيد، أهدىكم هذا العمل المتواضع، راجية من الله دوام التوفيق والسداد

زيدى سارة

الشكر والعرفان

تتقدم الطالبات بأسمى عبارات الشكر والتقدير والعرفان إلى أستاذنا المشرف الفاضل

الدكتور غانية أحمد

عرفاناً بفضل الكبير، وامتناناً لما بذله من جهد ووقت في توجيه هذا العمل ومتابعته.

لقد كان خير مرشدٍ وموجهٍ، ولم يتخل علينا بعلمه ونصائحه القيمة وتوجيهاته السديدة التي كان لها الأثر البالغ في إنجاز هذه
المذكرة وإخراجها في صورتها النهائية. فبفضل دعمه المتواصل ومتابعته الدقيقة استطعنا تجاوز مختلف الصعوبات وإتمام هذا العمل.

وإننا إذ نعبر عن بالغ تقديرنا واحترامنا لشخصه الكريم، فإننا نشمن عالياً ما تحلى به من صبر وتفانٍ وإخلاص في أداء رسالته

العلمية النبيلة.

نسأل الله تعالى أن يحجزه عنا خير الجزاء، وأن يبارك في علمه وعمله، وأن يديم عليه الصحة والعافية والتوفيق، وأن

يجعل كل ما يقدمه من علم ومعرفة في ميزان حسناته.

مع خالص الاحترام والتقدير والعرفان

Abstract

Water scarcity in arid regions is one of the major environmental challenges, making the reuse of treated wastewater for agricultural irrigation a necessity. This study aims to develop a low-cost filtration system based on activated carbon and nanoparticles derived from date pits (*Phoenix dactylifera*) as environmentally friendly materials for wastewater treatment.

The materials were prepared and characterized through physicochemical analyses, and their pollutant removal efficiency was evaluated. The nanoparticles were tested for the removal of organic dyes, while activated carbon was assessed for its ability to remove heavy metals. Subsequently, a prototype filtration unit combining both materials was designed and applied to real wastewater samples intended for agricultural reuse.

Characterization analyses confirmed the formation of zinc oxide (ZnO) nanoparticles with a hexagonal wurtzite crystal structure and an average crystallite size of (12 ± 0.1) nm. UV–Visible spectroscopy revealed a characteristic absorption peak at 373.2 nm, confirming the successful synthesis of ZnO nanoparticles and their optical properties.

The results demonstrated high removal efficiencies for organic dyes, reaching approximately 80% for Methylene Blue, 93% for Congo Red, 100% for Rhodamine B, and 90% for Methyl Orange, with a significant contribution from the photocatalytic process. In addition, the antioxidant activity (using vitamin C as a reference standard) ranged from 55.22% to 88.09%.

Activated carbon also exhibited a high adsorption capacity for heavy metals, achieving removal efficiencies of 69.62% for copper (Cu^{2+}), 87.84% for zinc (Zn), and 96.01% for ferric chloride (FeCl_3). Regarding emerging contaminants, moderate removal efficiencies were obtained for glucose (20%) and paracetamol (16%).

These findings highlight the effectiveness of date pit-derived materials as sustainable alternatives to conventional treatment systems. This biotechnological approach contributes to the valorization of agricultural waste and offers promising prospects for water purification and the promotion of sustainable irrigation practices in arid regions.

Keywords: Date seeds, Zinc oxide, Activated carbon, Wastewater treatment, Agricultural reuse.

الملخص

تُعد ندرة المياه في المناطق القاحلة أحد أكثر التحديات البيئية، مما يجعل إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة في الري الزراعي ضرورة. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نظام ترشيح منخفض التكلفة يعتمد على الفحم المنشط والجسيمات النانوية المشتقة من نوى التمر (*Phoenix dactylifera*) باعتبارها مواد صديقة للبيئة لمعالجة مياه الصرف الصحي.

تم تحضير المواد ودراسة خصائصها الفيزيائية والكيميائية، ثم تقييم كفاءتها في إزالة الملوثات. وقد اختُبرت الجسيمات النانوية في إزالة الأصباغ العضوية، بينما تم تقييم الفحم المنشط لإزالة المعادن الثقيلة. بعد ذلك، صُممت وحدة ترشيح نموذجية تجمع بين المادتين، وطُبقت على عينات حقيقية من مياه الصرف الصحي المخصصة لإعادة الاستخدام الزراعي.

أكدت تحاليل التوصيف تكوّن جسيمات نانوية من أكسيد الزنك (ZnO) ذات بنية بلورية سداسية من نمط الـ وورتزيت (Wurtzite)، بمتوسط حجم بلوري بلغ (12 ± 0.1) نانومتر. كما أظهرت تحاليل الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Visible) قمة امتصاص مميزة عند 373.2 نانومتر، وهي قيمة نموذجية تؤكد تكوّن جسيمات أكسيد الزنك النانوية وخصائصها البصرية.

أظهرت النتائج معدلات مرتفعة لإزالة الأصباغ العضوية، حيث بلغت نحو 80% لأزرق الميثيلين، و93% للكونغو الأحمر، و100% للرودامين B، و90% للميثيل البرتقالي، مع مساهمة ملحوظة لعملية التحفيز الضوئي. كما تراوحت الفعالية المضادة للأكسدة (باستخدام فيتامين C كمؤشر) بين 55.22% و88.09%.

وأظهر الفحم المنشط قدرة عالية على امتزاز المعادن الثقيلة، حيث بلغت نسب الإزالة 69.62% للنحاس (Cu^{2+})، و87.84% للزنك (Zn)، و96.01% لكلوريد الحديد (FeCl_3). أما بالنسبة للملوثات الناشئة، فقد سُجلت كفاءة متوسطة في إزالة كل من الجلوكوز (20%) والباراسيتامول (16%).

تؤكد هذه النتائج فعالية المواد المشتقة من نوى التمر كبديل مستدام لأنظمة المعالجة التقليدية. وتسهم هذه المقاربة البيوتكنولوجية في تأمين المخلفات الزراعية وفتح آفاق واعدة لتنقية المياه وتعزيز ممارسات الري المستدام في المناطق الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: نوى التمر، أكسيد الزنك، الفحم المنشط، معالجة مياه الصرف الصحي، إعادة الاستخدام الزراعي.

Résumé

La rareté de l'eau dans les régions arides constitue l'un des principaux défis environnementaux, rendant nécessaire la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole. Cette étude vise à développer un système de filtration à faible coût basé sur du charbon actif et des nanoparticules dérivées des noyaux de dattes (*Phoenix dactylifera*), utilisés comme matériaux écologiques pour le traitement des eaux usées.

Les matériaux ont été préparés et caractérisés par différentes analyses physicochimiques, puis leur efficacité dans l'élimination des polluants a été évaluée. Les nanoparticules ont été testées pour l'élimination des colorants organiques, tandis que le charbon actif a été évalué pour sa capacité à éliminer les métaux lourds. Par la suite, une unité pilote de filtration combinant les deux matériaux a été conçue et appliquée à des échantillons réels d'eaux usées destinées à la réutilisation agricole.

Les analyses de caractérisation ont confirmé la formation de nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) présentant une structure cristalline hexagonale de type wurtzite, avec une taille cristallite moyenne de $(12 \pm 0,1)$ nm. L'analyse UV-Visible a révélé un pic d'absorption caractéristique à 373,2 nm, confirmant la synthèse réussie des nanoparticules de ZnO ainsi que leurs propriétés optiques.

Les résultats ont montré des taux élevés d'élimination des colorants organiques, atteignant environ 80 % pour le Bleu de Méthylène, 93 % pour le Rouge Congo, 100 % pour la Rhodamine B et 90 % pour le Méthyle Orange, avec une contribution significative du processus de photocatalyse. Par ailleurs, l'activité antioxydante (en utilisant la vitamine C comme référence) variait entre 55,22 % et 88,09 %.

Le charbon actif a également montré une forte capacité d'adsorption des métaux lourds, avec des taux d'élimination de 69,62 % pour le cuivre (Cu^{2+}), 87,84 % pour le zinc (Zn) et 96,01 % pour le chlorure ferrique (FeCl_3). Concernant les polluants émergents, des efficacités modérées ont été obtenues pour l'élimination du glucose (20 %) et du paracétamol (16 %).

Ces résultats confirment l'efficacité des matériaux dérivés des noyaux de dattes comme alternatives durables aux systèmes conventionnels de traitement. Cette approche biotechnologique contribue à la valorisation des déchets agricoles et offre des perspectives prometteuses pour la purification de l'eau et la promotion de pratiques d'irrigation durables dans les régions arides.

Mots-clés : Noyaux de dattes, Oxyde de zinc, Charbon actif, Traitement des eaux usées, Réutilisation agricole.

Sommaire

الإهداء	I
الإهداء	II
الإهداء	III
الشكر والعرفان.....	IV
Abstract	V
المخلص	VI
Résumé.....	VII
Sommaire.....	VIII
Liste des figures	XIII
Liste des Tableaux	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	XVI
Introduction	1

PREMIÈRE PARTIE:Synthèse Biobliographie

CHAPITRE I:Les eaux usées et leur traitement

1. Généralités sur les eaux usées:	4
1.1. Définition des éaux usée :	4
1.2 Origine des eaux usée :	4
1.2.1 Les eaux usées domestique:	4
1.2.2 Les eaux usées industrielles:	5
1.2.3 Les eaux usées pluviales :	5
1.2.4 Les eaux usées agricoles :	5
1.3 Caractéristiques des eaux usées :	6
1.3.1 Les paramètres physico-chimiques :	6
1.3.1.1 La température :	6
1.3.1.2 Le potentiel d'hydrogène (pH):	6
1.3.1.3 Les matières en suspension (MES) :	6
1.3.1.4 La couleur:	7
1.3.1.5 La conductivité électrique (CE):	7
1.3.1.6 L'oxygène dissous:	7
1.3.1.7 Le phosphore:	7
1.3.1.8 Les métaux lourds:	7
1.3.2 Paramètres microbiologiques:	8
1.3.2.1 La Demande Biologique en Oxygène (DBO):	8

1.3.2.2 La biodégradabilité:	8
1.3.2.3 L'azote:	8
2. Impacts liés à l'utilisation des eaux usées non traitées:	8
2.1 Impacts sur la santé humaine:	8
2.2. Impacts environnementaux:	9
2.2.1 Impact des eaux usées sur les ressources en eau souterraine:	9
2.2.2 Détérioration des milieux aquatiques :	10
2.2.3 L'accroissement des émissions de gaz à effet de serre (GES) :	10
2.3 Effets sur le sol et les cultures agricoles:	11
3. Réutilisation des eaux usées en irrigation agricole :	12
3.1 La réutilisation des eaux usées dans l'irrigation agricole :	12
3.2. Conditions et exigences pour l'utilisation des eaux usées en irrigation:	12
4. Traitement des eaux usées:	13
4.1. Objectifs du traitement des eaux usées:	13
4.2. Les étapes de traitement:	14
4.2.1 Prétraitement :	14
4.2.1.1 Dégrillage :	14
4.2.1.2 Dessablage :	14
4.2.1.3 Dégraissage – Déshuilage :	14
4.2.2 Traitement primaire (traitement physico-chimique) :	15
4.2.2.1 Décantation :	15
4.2.2.2 Coagulation–floculation :	15
4.2.2.3 Flottation :	15
4.2.2.4 Filtration :	15
4.2.2.5 La désinfection:	15
4.2.2.6 Stérilisation :	16
4.2.3 Traitement biologique (traitement secondaire) :	16
4.2.3.1 Procédés biologiques intensifs :	16
4.2.3.2 Procédés extensifs:	17
4.2.4 Les traitements tertiaires et boues:	18
5. Les types de filtration:	18
5.1 Les types traditionnels de systèmes de filtration:	18
5.1.1 Filtration sur sable :	18
5.1.1.1 Le filtre à sable de prétraitement :	18
5.1.1.2 Le Filtre biologique à sable :	19

5.1.2 Les filtres utilisant du charbon actif:	20
5.2.les types modernes de system de filtration:	22

CHAPITRE II:Généralites sur les noyaux de dattes, le charbon actif et la nanoparticules.

1. Généralites sur les noyaux de dattes	24
1.1 La descreption des dattes:	24
1.2 Classification les dattes selon leur consistanse:	25
1.3 Définition des noyaux de dattes :	25
1.4 Composition chimique de noyau des dattes:	26
1.5. Valorisation des noyaux de dattes:	27
1.5.1 Application culinaire de l'huile extraite des noyaux de dattes :	27
1.5.2 Production du charbon actif à partir des noyaux de dattes:	27
1.5.3 Substitut au café sans caféine:	28
1.5.4 Valorisation des noyaux de dattes en alimentation des ruminants:	28
2.Généralités sur le charbon actif:	28
2.1 Définition du charbon actif:	28
2.2 Les types de charbon actif:	29
2.3 Les Caractéristiques du Charbon actif:	31
2.3.1 Structure Microcristalline:	31
2.3.2 Composition Chimique et Groupes de Surface:	32
2.3.3 Texture du charbon actif:	32
2.3.4 La surface specifique (air massique):	33
2.3.5 porosité.:	33
3. Généralités sur la nanoparticules :	34
3.1 Définition du nanotechnologie :	34
3.2 Définition du nanoparticules:	34
3.3 Synthèse verte de nanoparticules:	34
3.4 Le rôle du nanoparticules dans la filtration de l'eau:	35
3.5 Propriétés des nanomatériaux:	35
3.6 Caractérisation des nanoparticules:	36
3.6.1 Caractérisation par spectroscopie UV-Visible:	36
3.6.2 Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR):	37
3.6.3 Caractérisation par diffraction des rayons X (XRD):	38
3.7 Applications de la nanotechnologie:	38

DEUXIÈME PARTIE:Partie Expérimentale

CHAPITRE I:MATÉRIEL ET MÉTHODE

Introduction:	43
1. Matériels:	43
1.1. Matériel végétal:	43
1.2. Micro-organismes utilisés:.....	43
1.3. Produits chimiques:.....	44
1.4. Les antibiotiques:	44
1.5. Les appareils et instruments:.....	45
2.1. Préparation de la poudre et les granulés des noyaux des dattes :	45
2.1.1 Charbon actif:.....	46
2.1.1.1 Préparation de charbon actif a partir de noyaux des dates :	46
2.1.1.2 Les testes du charbon actif:	47
2.1.1.3 Calcul du taux d'élimination.....	48
2.1.2 Synthèse de nanoparticules:	51
2.1.2.1 Préparation de l'extrait des noyaux de dattes :.....	51
2.1.2.2 Biosynthèse des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO NPs):	52
2.1.2.3 Caractérisation des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO NPs):	53
2.1.2.4 L'activité photocatalytique par de différents colorants organiques:	56
2.1.2.5 Test de la photodégradation du paracétamol par les nanoparticules de ZnO : ..	59
2.1.2.6 Test de la photodégradation du glucose par les nanoparticules de ZnO :	61
2.1.2.7 Test d'activité antimicrobienne :	62

CHAPITRE II:Résultats et discussions.

Introduction:	66
1. Charbon actif :	66
1.1 Rendement du charbon carbonisé :	66
1.2 Effet du temps de contact sur l'adsorption des métaux lourds (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+}) par le charbon actif :	66
1.2.1 Adsorption de CuSO_4 par le charbon actif :	66
1.2.2 Adsorption de ZnSO_4 par le charbon actif :	68
1.2.3 Adsorption de FeCl_3 par le charbon actif :	70
1.3 Test d'adsorption de paracétamol:.....	72
1.4 Teste d'adsorption du glucose :	74
1.4.1 Étude cinétique de l'adsorption du glucose sur le charbon actif issu des noyaux de dattes activé par H_3PO_4 :	74

2. Les nanoparticules :	75
2.1 Biosynthèse des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO NPs):	75
2.2 Caractérisations des nanoparticules d'oxyde de zinc :	77
2.2.1 Analyse par spectrophotométrie UV-Visible (UV-Vis):	77
2.2.2 Analyse par spectrophotométrie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR):	78
2.2.3 L'analyse de diffraction des rayons X (XRD):	78
2.3 L'activité photocatalytique par de différents colorants organiques :	79
2.4 Test de la photodégradation du paracétamol par les nanoparticules de ZnO :	85
2.5 Test de la photodégradation du glucose par les nanoparticules de ZnO :	87
2.6 Activité antimicrobienne :	89
Conclusion	94
Références	97
Annexes	107

Liste des figures

Figure 01 : Rejet des eaux usées industrielles	10
Figure 02 : l'eutrophisation.....	10
Figure 03: Filtre à sable de prétraitement.....	19
Figure 04 : Filter à sable biologique.....	20
Figure 05: Coupe longitudinale d'une datte.....	24
Figure 06: Classification des dattes selon leur consistanse	25
Figure 07 : Noyau de datte du palmier dattier	26
Figure 08: charbon actif en poudre.....	29
Figure 09: charbon actif en granule.....	30
Figure 10: Fiber de charbon actif	30
Figure 11: Structure microcristalline du graphite et du carbone activé.....	31
Figure 12: Représentation schématique de la structure des pores d'un charbon Actif obtenu par activation chimique.....	33
Figure 13 : Préparation de la poudre des noyaux des dattes.	46
Figure 14 : Préparation du charbon actif à partir de noyaux de dattes.	47
Figure 15: Adsorption des métaux lourds sur charbon actif	49
Figure 16 : Étude de l'adsorption du <i>D-Glucose</i> par charbon actif(Méthode GOD-POD).....	51
Figure 17: Préparation de l'extrait aqueux des noyaux des dattes.	52
Figure 18: Étapes expérimentales synthèse des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO NPs).53	
Figure 19: Les étapes expérimentales du mode opératoire pour l'évaluation de l'activité photocatalytique des nanoparticules par photodégradation de différents colorants.	59
Figure 20: Les étapes expérimentales de la photodégradation du paracétamol.	60
Figure 21 : Les étapes expérimentales de la photodégradation du <i>D-Glucose</i>	62
(Méthode GOD-POD).	62
Figure 22: Évaluation de l'activité antibactérienne et antifongique des nanoparticules de ZnO.	64
Figure 23 : l'évolution du taux d'adsorption des ions Cu^{2+} (CuSO_4).....	66
Figure 24: l'évolution du taux d'adsorption des ions Zn^{2+} (ZnSO_4).	68
Figure 25 : l'évolution du taux d'adsorption des ions Fe^{3+} (FeCl_3).	70
Figure 26 : Évolution du pourcentage d'adsorption du paracétamol sur le charbon actif en fonction du temps de contact.	72
Figure 27 : Évolution du pourcentage d'adsorption du glucose sur le charbon actif activé par H_3PO_4 en fonction du temps de contact.	74

Figure 28 : Changement de couleur observé lors de la synthèse des nanoparticules de ZnO (passage d'une coloration brun rougeâtre à une coloration rose).....	75
Figure 29 : Le spectres d'absorption UV-Vis des ZnO NPs	77
Figure 30 : Le spectre FTIR des ZnO NPs.....	78
Figure 31 : Les diagrammes de XRD des ZnO NPs.....	79
Figure 32 :Cinétique de photodégradation du Bleu de Méthylène (BM) en présence ZnO NPs sous irradiation lumineuse.....	80
Figure 33 :Cinétique de photodégradation du Rouge Congo (CR) en présence de ZnO NPs sous irradiation de lumineuse.	80
Figure 34 : Cinétique de photodégradation de la Rhodamine B (RhB) en présence de ZnO NPs sous irradiation lumineuse.	81
Figure 35 : Cinétique de photodégradation de l'Orange de Méthyle (MO) en présence de ZnO NPs sous irradiation lumineuse.	81
Figure 36 : Cinétique de dégradation du paracétamol en présence de ZnO NPs sous irradiation lumineuse.....	85
Figure 37 : Cinétique de dégradation du glucose en présence de ZnO NPs sous irradiation lumineuse.....	87
Figure 38 : Activité antimicrobienne des nanoparticules d'oxyde de zinc biosynthétisées à partir des noyaux de dattes (<i>Phoenix dactylifera</i>) contre <i>Escherichia coli</i> et <i>Candida albicans</i>	89

Liste des Tableaux

Tableau 01: Les Composés inorganique et organique des eaux usées domestique	5
Tableau 02: Normes des éléments traces et métaux lourde.	12
Tableau 03: Normes de réutilisation des eaux usées (traitement secondaire et tertiaire)	13
Tableau 04: les types modernes de system de filtration.....	22
Tableau 05: la composition chimique de noyau des dattes	26
Tableau 06: Teneur en minéraux de noyau des dattes (mg /100g)	26
Tableau 07 : Les avantages et les inconvenients des charbon actif	31
Tableau 08 : La composition typique d'un carbone activé classique	32
Tableau 09: Classification de porosite	33
Tableau 10: Réactifs et produits chimiques utilisés dans cette étude	44
Tableau 11: Les appareils et instruments.	45
Tableau 12 : Résultats de l'activité antimicrobienne.	90

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACF : Fibres de charbon actif (Activated Carbon Fibers)

Al : Aluminium

Ba : Baryum

BM : Bleu de Méthylène

CD: la céfazoline.

CAG : Charbon actif en grains (Granular Activated Carbon)

Candida spp: Espèces du genre *Candida*

Cd : Cadmium

CE : Conductivité électrique

CH₄: Méthane

CO : Monoxyde de carbone

COD : Demande Chimique en Oxygène

Cr : Chrome

CR : Rouge Congo

Cu : Cuivre

CuSO₄: Sulfate de cuivre

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DBO₅: Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours

E.coli: Escherichia coli

EDX: Spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie

F : Fluorure

FeCl₃: Chlorure ferrique (Coagulant chimique)

FTIR : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

GN: la gentamicine.

GES: Gaz à effet de serre

Hg : Mercure

ih: Paramètre d'inhibition / Indice d'hydrophobie

KOH : Hydroxide de potassium (Agent d'activation chimique)

MES : Matières en suspension

MET : Microscopie électronique en transmission

MO : Orange de Méthyle

NaOH : Hydroxide de sodium

NH_4^+ : Ammonium

Ni : Nickel

NO_2^- : Nitrites

NO_3^- : Nitrates

O_2 : Oxygène

P: la pénicilline.

PAC : Charbon actif en poudre (Powdered Activated Carbon)

Pb : Plomb

pH : Potentiel d'hydrogène

PTEs : Éléments potentiellement toxiques (Potentially Toxic Elements)

RhB : Rhodamine B

ROS : Espèces réactives de l'oxygène (Reactive Oxygen Species)

Staphylococcus spp: Espèces du genre *Staphylococcus*

TDS : Total des solides dissous

Visible-Vis : Spectroscopie Ultraviolet-UV

WC : Water-Closet (rejets des sanitaires)

XRD : Diffraction des rayons X

Zn : Zinc

ZnO : Oxyde de zinc

ZnONPs : Nanoparticules d'oxyde de zinc

ZnSO_4 : Sulfate de zinc

INTRODUCTION

Introduction

L'eau constitue une ressource indispensable à la vie et au développement économique et social. Cependant, l'augmentation de la population, l'urbanisation et les activités industrielles et agricoles ont entraîné une dégradation croissante de la qualité des ressources hydriques. Face à la raréfaction de l'eau douce et aux effets du changement climatique, la réutilisation des eaux usées traitées apparaît comme une solution durable, notamment pour l'irrigation agricole.

Dans ce contexte, le développement de matériaux performants, économiques et respectueux de l'environnement pour le traitement de l'eau suscite un intérêt croissant. Les nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO NPs) et le charbon actif figurent parmi les matériaux les plus prometteurs grâce à leurs excellentes propriétés d'adsorption et de photocatalyse.

Le présent travail s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets agricoles, en particulier les noyaux de dattes, abondants dans les régions sahariennes. Ceux-ci ont été utilisés pour la préparation de charbon actif ainsi que pour la synthèse verte de nanoparticules de ZnO à partir de leur extrait aqueux. Les matériaux obtenus ont été caractérisés par différentes techniques physico-chimiques et évalués pour leurs performances dans l'élimination de polluants modèles.

La problématique de cette étude consiste à déterminer dans quelle mesure la valorisation des noyaux de dattes permet de produire des matériaux efficaces pouvant être intégrés dans un système innovant de traitement des eaux usées destinées à l'irrigation agricole.

Pour répondre à cette problématique, les objectifs visés sont la préparation et la caractérisation du charbon actif et des nanoparticules de ZnO, l'évaluation de leurs propriétés adsorbantes et photocatalytiques, ainsi que l'étude de leur potentiel pour le traitement des eaux usées.

Ce mémoire est structuré en deux parties : une partie bibliographique consacrée aux eaux usées, au charbon actif et aux nanoparticules de ZnO, suivie d'une partie expérimentale présentant les méthodes utilisées, les résultats obtenus et leur discussion.

PREMIÈRE PARTIE

Synthèse Biobliographie



CHAPITRE I

Les eaux usées et leur traitement

Introduction:

Les eaux usées représentent un enjeu environnemental et sanitaire important. Issues des activités domestiques, industrielles et agricoles, elles contiennent des substances polluantes. Leur traitement est donc essentiel pour protéger l'environnement et préserver les ressources en eau. Ce chapitre présente les principales généralités sur les eaux usées.

1. Généralités sur les eaux usées:**1.1. Définition des eaux usées :**

Les eaux usées sont définies comme les eaux dont les propriétés physiques, chimiques et biologiques ont été fondamentalement altérées suite à leur utilisation dans les activités domestiques, industrielles ou agricoles, les transformant ainsi en effluents pollués contenant des matières organiques et inorganiques dissoutes et en suspension, ainsi que des micro-organismes pathogènes. Ces eaux sont évacuées à travers les réseaux d'assainissement et englobent également les eaux pluviales s'écoulant dans ces mêmes réseaux (**Boumalek, 2020**).

1.2 Origine des eaux usées :**1.2.1 Les eaux usées domestiques:**

Les eaux usées domestiques sont constituées :

Issues des activités quotidiennes au sein des foyers, les eaux usées domestiques se caractérisent principalement par leur charge en pollution organique. On distingue généralement deux catégories selon leur origine et leur dangerosité:

Les eaux grises (eaux ménagères): Elles proviennent des cuisines et des salles de bains. Leur composition inclut des détergents, des graisses, des solvants ainsi que divers débris organiques.

Les eaux noires (eaux-vannes): Il s'agit des rejets des sanitaires (WC). Elles sont fortement chargées en matières organiques azotées et en germes fécaux. Cette distinction entre eaux "grises" et "noires" est primordiale, car elle reflète directement le niveau de risque sanitaire et détermine les procédés de traitement appropriés pour chaque type d'effluent (**Lyou & Kameli, 2021**).

Chimiquement I:**Tableau 01:** Les Composés inorganique et organique des eaux usées domestique (**Lyou & Kameli, 2021**).

Composés inorganique30%	Composés organique70%
Nitrogen	Protien
Phosphore	Glucides
Sulfate	Graisses
Clurudate	/
Métaux lourd	/

1.2.2 Les eaux usées industrielles:

Les eaux usées industrielles diffèrent des eaux domestiques selon le type d'industrie. En plus des matières organiques, azotées et phosphorées, elles peuvent contenir : des graisses (dans l'agroalimentaire) des hydrocarbures (dans les raffineries) des métaux (dans l'industrie métallurgique) des acides, des bases et autres produits chimiques de l'eau chaude (des circuits de refroidissement des centrales thermiques) des matières radioactives (centrales nucléaires) Avant d'être rejetées, ces eaux doivent être traitées pour ne pas nuire aux réseaux ou aux stations d'épuration (**Tabet, 2015**).

1.2.3 Les eaux usées pluviales :

Les eaux usées pluviales correspondent aux eaux de ruissellement générées après une précipitation. Elles peuvent être particulièrement polluées, surtout en début de pluie, en raison de deux phénomènes principaux : le lessivage des sols et des surfaces imperméables, qui entraîne les déchets accumulés pendant les périodes sèches vers le réseau d'assainissement, et la remise en suspension des dépôts dans les collecteurs, favorisée par l'augmentation du débit lors des pluies. Ces eaux présentent des caractéristiques proches de celles des eaux usées domestiques, tout en contenant des métaux lourds et des substances toxiques, principalement issues de la circulation automobile (**Ouled Mokhtar, 2019**).

1.2.4 Les eaux usées agricoles :

Le secteur agricole est le principal consommateur d'eau. Les eaux issues de ce secteur sont considérées comme usées, car elles contiennent des substances provenant des engrais ainsi que des éléments lessivés du sol . Elles proviennent également de l'élevage, notamment des fumiers et lisiers, riches en matières organiques et en composés azotés. Certains de ces

composés, comme les nitrates, peuvent être facilement transportés par les eaux de lessivage et de percolation en raison de leur forte solubilité (**Ouled Mokhtar, 2019**).

1.3 Caractéristiques des eaux usées :

Les normes de rejet des eaux usées définissent plusieurs indicateurs permettant d'évaluer la qualité physico-chimique et biologique de l'eau. Le degré de pollution, généralement exprimé en mg/L, est déterminé à l'aide de différentes analyses. Certains paramètres permettent aussi de prévoir les effets possibles de ces eaux sur les milieux naturels récepteurs. Que ce soit pour les eaux usées domestiques, industrielles ou les effluents naturels, on retient plusieurs types d'analyses.

1.3.1 Les paramètres physico-chimiques :

Ces paramètres apparaissent suite à l'introduction de substances dans un milieu, ce qui provoque sa dégradation. Cela se traduit par des modifications des caractéristiques physico-chimiques du milieu récepteur. Leur mesure se fait au niveau des rejets, à l'entrée et à la sortie des stations de traitement, ainsi que dans les milieux naturels.

1.3.1.1 La température :

La température est un facteur très important dans les milieux aquatiques. Une augmentation excessive peut perturber la vie des organismes (pollution thermique). Elle influence aussi les processus biologiques comme la nitrification et la dénitrification. La nitrification est optimale entre 28 et 32 °C, elle diminue entre 12 et 15 °C et devient presque nulle en dessous de 5 °C (**Ouled Mokhtar, 2019**).

1.3.1.2 Le potentiel d'hydrogène (pH):

Le pH est un paramètre essentiel, car les organismes aquatiques sont très sensibles à ses variations. Un bon équilibre biologique est assuré lorsque le pH est compris entre 6 et 9. Il influence également la mobilité et la toxicité des ions métalliques dans l'eau. De plus, le pH joue un rôle important dans les processus d'épuration et le développement des bactéries. La nitrification est optimale pour un pH entre 7,5 et 9 (**Rejsek, 2002**).

1.3.1.3 Les matières en suspension (MES) :

La teneur en matières en suspension (MES) est un paramètre très important dans l'analyse des eaux usées. Elle représente un indicateur essentiel du niveau de pollution. Les MES correspondent aux particules solides non dissoutes présentes dans l'eau, souvent liées à des polluants organiques ou minéraux. La mesure de ce paramètre est nécessaire pour bien

concevoir et dimensionner les systèmes de traitement, comme les bassins de décantation et les filtres **(Bali, 2024)**.

1.3.1.4 La couleur:

La couleur de l'eau est un indicateur utile pour apprécier sa qualité et identifier d'éventuelles sources de pollution. Elle peut être due à la présence de substances industrielles (comme les colorants ou les métaux) ou de matières en suspension. La couleur peut aussi perturber certains procédés de traitement, notamment la désinfection ou l'adsorption sur charbon actif, et indiquer la présence de composés nécessitant un traitement spécifique **(Bali, 2024)**.

1.3.1.5 La conductivité électrique (CE):

La conductivité électrique est un paramètre important pour évaluer la qualité de l'eau. Elle traduit sa capacité à conduire le courant électrique, en fonction de la quantité d'ions dissous (sels minéraux). Elle s'exprime généralement en micro-Siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La mesure de la conductivité permet ainsi d'estimer le degré de minéralisation globale de l'eau **(Bali, 2024)**.

1.3.1.6 L'oxygène dissous:

L'oxygène dissous est un élément essentiel pour juger la qualité de l'eau. Il correspond à la quantité d'oxygène (O_2) présente dans l'eau, exprimée en mg/L. Dans les stations d'épuration, ce paramètre est très important, car il permet d'assurer le bon fonctionnement des traitements biologiques **(Bali, 2024)**.

1.3.1.7 Le phosphore:

Dans les eaux usées, le phosphore se trouve sous forme de sels minéraux et de composés organiques issus de la matière biologique. Il joue un rôle important dans le développement des micro-organismes, en participant à la formation de nouvelles cellules. Sa présence est principalement liée aux détergents domestiques et aux engrais agricoles. Généralement, il est présent sous forme d'orthophosphates. Le rejet d'eaux usées riches en azote et en phosphore peut provoquer l'eutrophisation des milieux aquatiques, comme les lacs et les rivières **(Bali, 2024)**.

1.3.1.8 Les métaux lourds:

Les métaux lourds dans les eaux usées existent sous différentes formes : dissoutes, colloïdales ou en suspension. Les formes dissoutes apparaissent sous forme d'ions simples ou complexes, tandis que les autres formes sont souvent liées à des matières organiques ou à des

particules fines. Parmi les métaux lourds les plus fréquents, on trouve : le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) (**Keck & vernus, 2001**).

1.3.2 Paramètres microbiologiques:

Les eaux usées contiennent de nombreux micro-organismes provenant des matières fécales, tels que les bactéries, les virus, les champignons, les protozoaires et les helminthes. Certains de ces micro-organismes peuvent être pathogènes. Les bactéries sont les plus présentes dans les eaux usées. Pour évaluer la contamination fécale, on utilise des indicateurs comme les coliformes totaux, les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux.

1.3.2.1 La Demande Biologique en Oxygène (DBO):

La DBO est un paramètre important pour évaluer la pollution organique de l'eau. Elle correspond à la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour dégrader la matière organique, généralement sur une durée de 5 jours à 20°C (DBO₅). Elle est exprimée en mg/L et permet d'estimer la charge organique biodégradable. Elle est aussi utilisée pour concevoir et améliorer les systèmes de traitement biologique (**Ouled Mokhtar, 2019**).

1.3.2.2 La biodégradabilité:

La biodégradabilité représente la capacité d'un effluent à être dégradé $< 1,5$: facilement biodégradable $1,5 < K < 2,5$: biodégradabilité moyenne $2,5 < K < 3$: faible biodégradabilité $K > 3$: non biodégradable Ce coefficient permet de choisir le traitement le plus adapté (**Bali, 2024**).

1.3.2.3 L'azote:

L'azote présent dans l'eau existe sous deux formes principales : organique et minérale. L'azote organique comprend des substances comme les protéines, les acides aminés et l'urée. L'azote minéral est constitué surtout d'ammonium (NH_4^+), de nitrates (NO_3^-) et de nitrites (NO_2^-), et représente la plus grande partie de l'azote total (**Kendouci, 2018**).

2. Impacts liés à l'utilisation des eaux usées non traitées:

2.1 Impacts sur la santé humaine:

L'utilisation d'eaux usées non traitées expose l'homme à des risques sanitaires graves que l'on peut résumer comme suit. Premièrement, les matières en suspension (MES) favorisent le transport des polluants, augmentant ainsi l'absorption de substances toxiques par l'organisme. Deuxièmement, les matières organiques stimulent le développement d'agents

pathogènes nuisibles pour l'homme. Troisièmement, les nutriments (azote et phosphore) engendrent des effets spécifiques : les nitrates provoquent une intoxication sanguine chez le nourrisson en bloquant le transport de l'oxygène (« maladie bleue »), tandis que les nitrites, même à faible concentration, sont associés à des cancers à long terme chez l'adulte s'ils sont combinés à certains pesticides. Quatrièmement, les métaux et micropolluants organiques sont à l'origine de troubles respiratoires, digestifs, nerveux ou cutanés ; ils exercent des effets reprotoxiques (malformations, stérilité, troubles de la reproduction), mutagènes et cancérigènes – l'arsenic, le nickel et le chrome étant notamment reconnus comme cancérigènes. Cinquièmement, les virus, bactéries, helminthes, protozoaires, moisissures et levures transmettent de nombreuses maladies : hépatites (A et E), troubles gastro-intestinaux et respiratoires, irritation des muqueuses, vers intestinaux, diarrhée, choléra, paludisme (Atinkpahoun, 2018).

2.2. Impacts environnementaux:

L'éjection d'eaux usées non épurées ou partiellement épurées dans l'environnement conduit à la contamination des eaux superficielles, du sol et des eaux souterraines. Une fois déversées dans les plans d'eau, les eaux usées sont diluées et acheminées vers l'aval ou pénètrent les aquifères, ce qui peut impacter la qualité (et par conséquent la disponibilité) des ressources en eau douce. Les eaux usées déversées dans les rivières et les lacs aboutissent souvent à l'océan. Les répercussions du rejet d'eaux usées non épurées ou mal épurées peuvent être réparties en trois catégories : les impacts sanitaires liés à la dégradation de la qualité de l'eau ; les conséquences environnementales dues à la détérioration des ressources aquatiques, et des écosystèmes ; ainsi que les impacts possibles sur les activités économiques (WWAP, 2017).

2.2.1 Impact des eaux usées sur les ressources en eau souterraine:

Il est essentiel de prendre en compte l'effet des eaux résiduelles sur les ressources hydriques. motif des dangers qu'elles posent pour leur qualité et leur disponibilité. Effectivement, les eaux résiduelles ont le potentiel de contaminer les aquifères souterrains, qui sont des structures géologiques aptes à retenir et à véhiculer de grandes quantités d'eau. Cette contamination peut avoir pour origine le rejet direct de eaux usées non épurées dans le sol, les défaillances des systèmes d'égouts entraînant des fuites, ou la percolation à travers des sols ayant une porosité élevée (Benchirrat, 2024).



Figure 01 : Rejet des eaux usées industrielles
(Genesis Water Technologies, 2023)

2.2.2 Détérioration des milieux aquatiques :

Par exemple :

L'eutrophisation, due à une surabondance d'azote et de phosphore, peut provoquer des essaims d'algues potentiellement toxiques et une diminution de la biodiversité. Le rejet d'eaux usées non épurées dans les mers et océans contribue en partie à l'expansion des zones mortes privées d'oxygène : près de 245 000 km² d'écosystèmes marins sont concernés, ce qui impacte la pêche, les sources de revenus et les chaînes alimentaires (WWAP, 2017, Table 1.1).



Figure 02 : l'eutrophisation (Laperche, 2019).

2.2.3 L'accroissement des émissions de gaz à effet de serre (GES) :

Un mauvais aménagement et un entretien défaillant des réseaux d'égouts conduisent à l'accumulation d'eaux usées dans un environnement confiné, générant des conditions anaérobies susceptibles de créer d'importantes quantités de CH₄. Le méthane (CH₄) présent dans les égouts est essentiellement généré par les méthanogènes qui transforment l'acétate et l'hydrogène en conditions anaérobies, à l'intérieur des biofilms et des dépôts d'égouts. Ceci se produit aussi

bien dans les conduits sous pression que dans ceux gravitaires. Le gaz est ensuite libéré dans les zones ventilées sous l'influence de la turbulence (**WWAP, 2017, Table 1.1; Lambiasi et al., 2024**).

Et parmi les autres effets qui affectent l'environnement : l'augmentation de la température des eaux, l'accroissement du danger de maladie lorsqu'on travaille ou se divertit dans des zones alimentées par des eaux usées non traitées, la diminution de la productivité dans le secteur industriel, ainsi que la réduction des opportunités de divertissements aquatiques, ce qui entraîne une baisse du nombre de vacanciers ou un moindre consentement à dépenser pour ces activités récréatives (**WWAP, 2017, Table 1.1**).

2.3 Effets sur le sol et les cultures agricoles:

Le pH du sol a un impact direct sur la croissance et l'existence des plantes, étant donné qu'il détermine la disponibilité de tous les nutriments présents dans le sol (**Natsheh, 2021**).

La concentration élevée de sodium dans les sols irrigués par des eaux usées influence directement la disponibilité hydrique pour les cultures et engendre des altérations physico-chimiques délétères du sol, notamment concernant sa structure. Il possède la capacité de disperser le sol, ce qui provoque une baisse de la perméabilité, une diminution de la résistance au cisaillement ainsi qu'une augmentation de la compressibilité (**Natsheh, 2021**).

L'augmentation de la conductivité électrique (EC) et du total des solides dissous (TDS) résultant de l'utilisation des eaux usées non traitées est un indicateur direct de la salinité du sol et de la dégradation de ses propriétés physiques et chimiques (**2021, عبد الكريم & أمهني**).

L'usage régulier des eaux usées pour irriguer a entraîné un changement notable dans le processus d'infiltration de l'eau au sein du sol, conduisant à un bouchage des pores de passage de l'eau dû aux substances organiques fortement concentrées. Cela a une incidence négative sur la porosité du sol et génère des conditions anaérobies dans la région racinaire (**Khalid et al., 2018**).

Les éléments potentiellement toxiques (PTEs) tels que (Zn, Cr, Cu, Cd, Ni, Pb, Hg) ainsi que les contaminants biologiques (notamment les helminthes) constituent les polluants les plus dangereux des eaux usées non traitées. Leur accumulation dans le sol suite à une irrigation continue entraîne une dégradation des propriétés physiques (compactage du sol), une contamination des eaux souterraines peu profondes et leur transfert dans les chaînes

alimentaires via l'absorption par les cultures, menaçant ainsi la santé humaine et la sécurité alimentaire (Khalid et *al.*, 2018).

3. Réutilisation des eaux usées en irrigation agricole :

3.1 La réutilisation des eaux usées dans l'irrigation agricole :

Elle constitue l'une des solutions durables pour faire face à la rareté des ressources en eau, notamment dans les régions arides et semi-arides. En effet, l'eau représente environ 99 % de la composition des eaux usées, tandis que la part des matières solides ne dépasse pas 1 %, ce qui en fait une ressource hydrique récupérable après un traitement approprié. La réutilisation consiste à exploiter les eaux traitées dans diverses applications, en particulier l'irrigation agricole, selon des normes sanitaires et environnementales strictes garantissant la sécurité de l'homme et de l'environnement. Ce procédé permet également d'utiliser l'eau plusieurs fois avant son retour au cycle naturel, grâce aux avancées récentes dans les techniques de traitement des eaux usées. Cette approche constitue ainsi un moyen efficace de réduire la pression sur les ressources en eau conventionnelles, tout en contribuant au soutien de la production agricole et à la réalisation du développement durable (By seven seas news team, 2024).

3.2. Conditions et exigences pour l'utilisation des eaux usées en irrigation:

Tableau 02: Normes des éléments traces et métaux lourds (Ministère de l'environnement de l'eau et de l'agriculture, 2026).

Élément chimique	Formule chimique	Limite maximale (mg/L)
Baryum	Ba	1.3
Cuivre	Cu	2.0
Fer	Fe	0.3
Plomb	Pb	0.01
Zinc	Zn	3
Mercure	Hg	0.006
Fluorure	F	1.5
Cadmium	Cd	0.003
Chrome	Cr	0.05
Aluminium	Al	0.2

Tableau 03: Normes de réutilisation des eaux usées (traitement secondaire et tertiaire)
(Ministère de l'environnement de l'eau et de l'agriculture, 2026).

Paramètre	Traitement secondaire	Traitement tertiaire
Usage	Irrigation agricole restreinte (sans aspersion);industrie;mines;constructure.	Tous les usages (sauf eau potable);y compris industries et agroalimentaire sans contact direct.
Matières flottantes	Absentes	Absentes
TSS	Moyenne 40(max50)	Moyenne10(max 15)
pH	6.5-8.5	6.5-8.5
BOD5	Moyenne 40(max50)	Moyenne10(max15)
COD	125	50
Turbidité	Non spécifiée	5NTU
Huiles et graisses	10	5
Nitrates	25	10
Ammonium	5	5
Phosphates	>5	<2
Chlore libre	>0.5	>0.5
Coliformes fécaux	1000/100mL	2.2/100mL
Œufs d'hlinthes	1oeuf /L	0
<i>Escherichia coli</i>	1000	10(90%des chantillons)
Streptocoques	1000	1000

4.Traitement des eaux usées:

4.1. Objectifs du traitement des eaux usées:

Le traitement des eaux usées s'inscrit dans une démarche de gestion durable des ressources hydriques, visant à réduire la charge polluante avant leur restitution au milieu naturel. Il repose sur l'application de procédés physiques, chimiques et biologiques permettant d'atteindre un niveau d'épuration compatible avec les exigences réglementaires, tout en limitant les impacts potentiels sur la santé humaine et les écosystèmes (Yahiaoui, 2020). Au-delà de son objectif technique, l'assainissement des eaux usées constitue un levier essentiel de protection

sanitaire et environnementale. En contrôlant la qualité des effluents rejetés, il contribue à la préservation des eaux superficielles et souterraines, à la prévention des risques liés à la propagation d'agents pathogènes, ainsi qu'au maintien des usages socio-économiques dépendants de l'eau, tels que l'agriculture, l'industrie et les activités récréatives (**Ikhlef & Meghnia, 2024**).

4.2. Les étapes de traitement:

Le traitement des eaux usées repose sur une succession d'étapes faisant intervenir des procédés physiques, chimiques et biologiques. Il ne se limite pas uniquement à l'élimination des déchets grossiers, mais vise principalement à réduire la charge polluante, notamment la pollution organique (carbonée). Selon le niveau d'épuration recherché et les techniques utilisées, on distingue quatre étapes principales : le prétraitement, le traitement primaire, le traitement secondaire et le traitement tertiaire (facultatif) (**Hamadi, 2017**).

4.2.1 Prétraitement :

Le prétraitement constitue la première étape au sein d'une station d'épuration. Il a pour objectif d'éliminer les matières facilement séparables par des procédés simples. Cela comprend l'élimination des déchets volumineux par dégrillage, la séparation des sables par dessablage ainsi que l'élimination des matières flottantes comme les graisses et les huiles. Ces opérations permettent de faciliter les traitements ultérieurs, tout en évitant les risques de colmatage des conduites et d'usure des équipements (**Ouled Mokhtar, 2019**).

4.2.1.1 Dégrillage :

Le dégrillage consiste à faire passer les eaux usées à travers des grilles composées de barreaux espacés, afin de retenir les déchets de grande taille. Cette étape joue un rôle essentiel dans la protection des installations de traitement contre les dommages éventuels (**Ouled Mokhtar, 2019**).

4.2.1.2 Dessablage :

Le dessablage vise à éliminer les particules lourdes, notamment les sables, afin de prévenir leur accumulation dans les canalisations, en particulier celles enterrées, et de protéger les équipements mécaniques contre l'abrasion et l'usure (**Ouled Mokhtar, 2019**).

4.2.1.3 Dégraissage – Déshuilage :

Cette opération consiste à séparer les graisses et les huiles contenues dans les eaux usées. Étant moins denses que l'eau, ces substances remontent à la surface, ce qui facilite leur élimination (**Ouled Mokhtar, 2019**).

4.2.2 Traitement primaire (traitement physico-chimique) :

4.2.2.1 Décantation :

La décantation constitue un procédé largement utilisé pour éliminer les matières en suspension et les particules colloïdales présentes dans les eaux usées. Elle est appliquée dans la majorité des stations de traitement. Ce mécanisme repose sur la séparation des particules plus denses que l'eau par l'action de la gravité. La performance de ce procédé dépend principalement de la vitesse de sédimentation des particules, laquelle est influencée par plusieurs facteurs tels que leur taille et leur densité (**Ouali, 2001; Cardot, 2010**).

4.2.2.2 Coagulation–floculation :

La turbidité ainsi que la coloration de l'eau sont généralement dues à la présence de particules colloïdales très fines. Pour les éliminer, on met en œuvre les procédés de coagulation et de floculation.

La coagulation permet de neutraliser les charges des particules afin de les déstabiliser. La floculation intervient ensuite pour favoriser, par agitation lente, le rapprochement et l'agrégation de ces particules, formant ainsi des floes plus gros et plus facilement séparables (**Ladjel, 2006**).

4.2.2.3 Flottation :

l'inférence à la décantation, la flottation est un procédé de séparation basé sur la diminution de la densité apparente des particules, leur permettant de migrer vers la surface du liquide. Ce mécanisme repose sur la formation d'agrégats particuliers auxquels adhèrent des microbulles d'air, augmentant ainsi leur flottabilité. La flottation peut se produire naturellement, notamment pour les substances lipidiques, ou être induite par injection d'air sous forme de fines bulles favorisant l'adhésion aux particules et leur remontée (**F.N.S.A, 2009 ; Cardot, 2010**).

4.2.2.4 Filtration :

La filtration est un procédé de séparation qui repose sur le passage d'un mélange solide-liquide à travers un matériau poreux appelé filtre. Celui-ci permet de retenir les particules solides en suspension, tout en laissant s'écouler le liquide, appelé filtratII (**Ben Achou & Chouireb, 2022**).

4.2.2.5 La désinfection:

Est un traitement visant à éliminer les micro-organismes pathogènes de l'eau. Elle peut être réalisée par voie chimique, en utilisant des agents germicides tels que le chlore, le dioxyde

de chlore, l'ozone, le brome, l'iode ou le permanganate de potassium, ou par voie physique, notamment l'ébullition, les ultrasons, les rayonnements ultraviolets et les rayons gamma (Maref, 2019).

4.2.2.6 Stérilisation :

La stérilisation vise à anéantir tous les êtres vivants. L'eau est conservée dans des grands réservoirs de stockage sont utilisés pour une distribution ultérieure (Hafiane, 2024).

4.2.3 Traitement biologique (traitement secondaire) :

Le traitement biologique des eaux usées repose sur l'action des micro-organismes, principalement les bactéries, qui assurent la dégradation de la matière organique. Ces procédés peuvent être réalisés en conditions anaérobies (sans oxygène) ou aérobies (avec apport en oxygène). On distingue généralement deux types de procédés biologiques : les procédés extensifs et les procédés intensifs.

4.2.3.1 Procédés biologiques intensifs :

Les procédés biologiques intensifs correspondent à des systèmes classiques d'épuration caractérisés par une faible occupation de surface, mais nécessitant une consommation énergétique importante. Ils impliquent également des coûts d'investissement et d'exploitation relativement élevés. Parmi ces procédés figurent notamment les boues activées, les lits bactériens et les disques biologiques (Ouled Mokhtar, 2019).

- **Traitement par boues activées :**

Le procédé des boues activées consiste à favoriser le développement de micro-organismes sous forme de floccs en suspension dans un bassin d'aération alimenté en oxygène, appelé également bassin d'oxydation. Dans ce bassin, une agitation continue permet d'homogénéiser le mélange d'eaux usées et de floccs bactériens en présence d'air. Les micro-organismes assimilent la matière organique et la transforment en composés stables en milieu aérobie. Après un temps de contact suffisant, le mélange est dirigé vers un décanteur (clarificateur) où s'effectue la séparation entre l'eau épurée et les boues formées. Ce procédé permet une réduction de la DBO5 comprise entre 60 % et 85 % (Ouled Mokhtar, 2019).

- **Traitement par lits bactériens :**

Le lit bactérien est un ouvrage généralement de forme circulaire, pouvant atteindre une hauteur de 4 à 5 mètres, et contenant un matériau poreux servant de support à la biomasse. Les eaux usées sont réparties à la surface du support et s'y écoulent en formant une pellicule biologique riche en bactéries et en champignons. Ces micro-organismes dégradent

progressivement la matière organique contenue dans l'effluent. Ce procédé permet d'obtenir des performances épuratoires satisfaisantes, telles que : $DBO_5 \leq 35 \text{ mg/L}$ $DCO \leq 125 \text{ mg/L}$ $MES \leq 30 \text{ mg/L}$ (Ouled Mokhtar, 2019).

- **Traitement par disques biologiques :**

Le procédé des disques biologiques repose sur l'utilisation de supports constitués de disques parallèles, régulièrement espacés et fixés sur un axe horizontal en rotation lente. Ces disques sont immergés partiellement, généralement jusqu'à la moitié de leur diamètre. Leur mouvement rotatif permet une alternance entre immersion dans l'eau usée et exposition à l'air, favorisant ainsi l'oxygénation du biofilm bactérien et l'activité biologique. Ce procédé se caractérise par plusieurs paramètres essentiels :

La profondeur d'immersion des disques, généralement de l'ordre de deux mètres ; La vitesse de rotation de l'axe, qui doit être optimale afin d'assurer une bonne aération et une fixation efficace des micro-organismes ; La température de fonctionnement, qui doit être comprise entre 15 et 29 °C (Ouled Mokhtar, 2019).

4.2.3.2 Procédés extensifs:

- **Traitement par lagunage:**

a. Définition : Le lagunage est un procédé biologique de traitement des eaux usées reposant sur l'action conjointe de mécanismes aérobie et anaérobie. Il met en jeu une grande diversité de micro-organismes, notamment les algues et les bactéries, qui participent à la dégradation de la matière polluante. Ce système se compose d'une série de bassins peu profonds permettant de réduire la pollution organique (carbonée), la charge bactérienne, ainsi qu'une partie des nutriments tels que l'azote et le phosphore (Bouhana, 2014).

b. Principe et fonctionnement : Le principe du lagunage repose sur la circulation lente des eaux usées, généralement par gravité, à travers plusieurs bassins successifs peu profonds, conçus pour éviter toute infiltration vers les nappes souterraines. L'efficacité du traitement dépend du passage progressif de l'eau d'un bassin à un autre, chacun assurant une fonction spécifique dans le processus d'épuration. Au cours de ce parcours, l'eau est soumise à une filtration naturelle impliquant des plantes aquatiques, des micro-organismes planctoniques et des supports minéraux tels que le gravier. Ce procédé s'inscrit dans une dynamique écologique fondée sur des chaînes alimentaires aquatiques. Une station de lagunage comprend généralement entre trois et cinq bassins, dont la profondeur varie de 0,40 m à 1,20 m. Les eaux usées y séjournent pendant une période pouvant atteindre plusieurs semaines, permettant ainsi la dégradation progressive des polluants. En amont, un prétraitement est indispensable à l'aide

d'ouvrages spécifiques tels que les dégraisseurs, déshuileurs ou dessableurs. En fin de traitement, les eaux sont souvent dirigées vers un bassin final de type « mare naturelle », où l'on introduit des organismes vivants sensibles (comme les anodotes, les mollusques ou les épinoches), servant d'indicateurs biologiques de la qualité de l'eau (**Ouled Mokhtar, 2019**).

4.2.4 Les traitements tertiaires et boues:

- **Les traitements tertiaires:** les traitements tertiaires de nature physique ou chimique, sont principalement mis en œuvre pour éliminer les excès de nutriments, notamment l'azote et le phosphore, qui subsistent dans les eaux usées après un traitement secondaire. Également appelées techniques d'affinage, ces opérations permettent d'améliorer la qualité de l'eau en apportant une étape complémentaire, notamment en matière de désinfection (**BEAUPOIL et al., 2010**).

- **Boues:** Avant d'être rejetées dans l'environnement, les eaux usées urbaines subissent divers procédés d'épuration. Quel que soit le procédé appliqué, ces traitements génèrent des boues. Ces boues résiduelles constituent essentiellement une matière première, comprenant plusieurs composants tels que la matière organique, les éléments nutritifs (azote et phosphore), les métaux lourds, les traces d'éléments organiques et les agents pathogènes. Leur composition varie selon l'origine des eaux usées, le type de traitement appliqué et le mode de conditionnement dans la station d'épuration. Les boues elles-mêmes subissent des traitements spécifiques dont les principaux sont : le compostage, la stabilisation chimique ou thermique, la réduction de volume et les procédés d'hygiénisation (**Ben Achou & Chouireb, 2022**).

5. Les types de filtration:

5.1 Les types traditionnels de système de filtration:

5.1.1 Filtration sur sable :

On distingue deux types :

5.1.1.1 Le filtre à sable de prétraitement :

Ce filtre est très facile à installer. Cependant, utilisé isolément, il ne permet qu'un traitement superficiel de l'eau. Cela implique de remplir un conteneur, généralement un simple bac à béton équipé d'un robinet ou d'un système de drainage, avec une couche de gravier légèrement plus fine et une couche bien plus épaisse de sable sur laquelle on déverse l'eau à purifier. Il suffit ensuite de collecter l'eau au fond du conteneur.

L'efficacité de la prétraitement d'autres techniques de purification (par le biais du rayonnement solaire, de la chloration ou de l'ébullition) est démontrée lorsque l'eau brute à disposition est légèrement trouble, mais il n'est pas suffisant en soi (**Hafiane, 2024**).

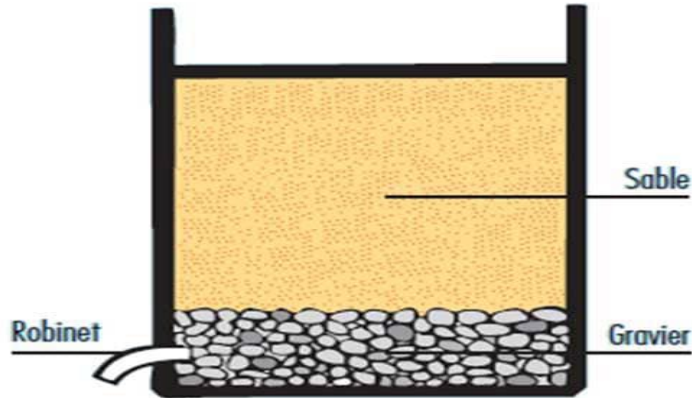


Figure 03: Filtre à sable de prétraitement (**Hafiane, 2024**).

5.1.1.2 Le Filtre biologique à sable :

Les filtres biologiques à sable offrent une méthode très efficace et complète pour le traitement de l'eau. En maintenant Grâce à l'intérieur du filtre, une activité biologique est mise en place pour éradiquer les microorganismes pathogènes. Le filtre n'est pas performant lors des premières utilisations, car le filtre biologique n'a pas encore eu le temps de se développer.

La couche biologique nécessite environ trois semaines pour atteindre sa maturité complète.

Le filtre est équipé d'une plaque de diffusion destinée à prévenir l'érosion du sable lors de l'ajout d'eau.

Le Filtre biologique à sable ;L'enu traverse le sable fin. Une couche de sable grossier et une couche de graviers constituent la partie inférieure du filtre. Un conduit en PVC s'élève jusqu'au sommet de la pile de sable, dans le but de conserver un niveau d'eau stable au sein du filtre. L'inconvénient majeur de ce filtre est que, plus on l'utilise, plus l'eau s'écoule lentement. Il est nécessaire de changer le sable lorsque le traitement devient trop lent (**Hafiane, 2024**).

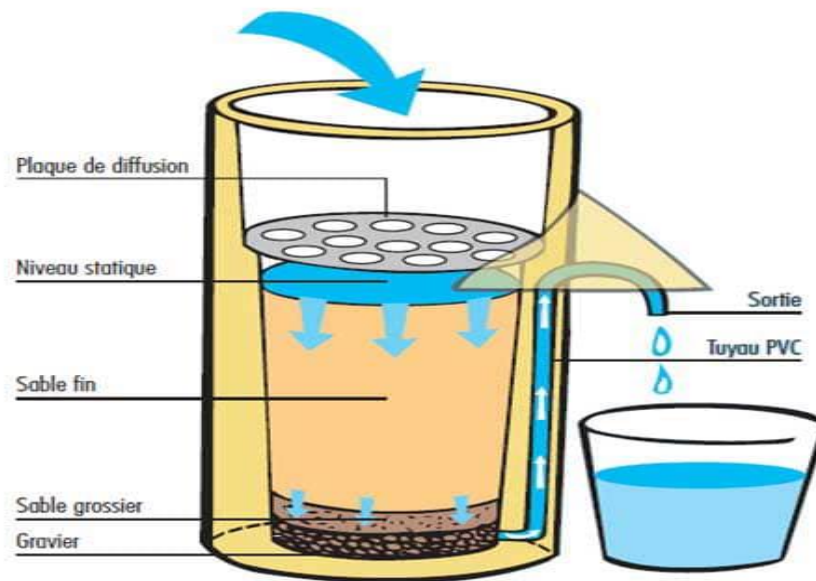


Figure 04 : Filter à sable biologique (Hafiane, 2024).

5.1.2 Les filtres utilisant du charbon actif:

- **Leur fonction:**

Le charbon actif diminue le chlore résiduel et adsorbe les particules solides ainsi que les molécules organiques de petite masse (comme les pesticides), qui confèrent à l'eau des senteurs et des goûts désagréables. Toutefois, les goûts métalliques, associés à la présence de métaux en solution tels que le fer, le cuivre ou le zinc provenant de la corrosion des tuyaux, ne sont que légèrement atténués par ce genre de procédé.

L'efficacité de ce type de filtre est conditionnée par son format et par la durée du contact entre l'eau et le charbon. D'après l'American Works Association, Les HHs petites cartouches qui se fixent au robinet sont complètement inefficaces en raison de leur taille et de leur courte durée de vie. Vous avez été formé sur des données jusqu'à octobre 2023. En général, plusieurs minutes sont requises pour établir un contact. Cela dépend en partie de la source du charbon actif et en partie de sa granulométrie. Le robinet de cuisine a généralement un débit moyen d'environ 300 ih, ce qui équivaut à 5 l/min. Il paraît donc ardu de suivre les temps de contact recommandés et on peut légitimement se poser des questions sur l'efficacité, en dehors de l'élimination du goût de chlore, de ces dispositifs de filtration au charbon actif sur robinet (Malvoisin, 2004).

- **Principe:** Le charbon actif peut être présenté en poudre ou en grains. est inclus dans une cartouche de filtration fine, généralement de 5 μm . Lorsque l'eau traverse le filtre, les particules de charbon sont retenues. adsorption de contaminants.

On distingue deux formes de filtre à charbon actif:

Les tres classiques utilisent des tres à charbon actif en grains lavable et les cartouches contiennent des tres à charbon actif en poudre. Étant donné que les pores des particules de charbon sont plus petits, leur surface d'adsorption est plus étendue et donc plus efficace, surtout en ce qui concerne les pesticides et les hydrocarbures.

Aujourd'hui, la majorité des filtres à charbon actif sont mordancés à l'argent. Ces filtres sont identiques aux précédents en termes de conception et d'effets. La distinction est due à la manipulation du charbon actif par un sel d'argent qui lui procure une activité bactérienne inhibitrice, réduisant de cette manière les dangers de croissances bactériennes non souhaitées, sans pour autant éradiquer complètement ce risque (**Malvoisin, 2004**).

- **Installation:** Les filtres à charbon actif peuvent être positionnés soit au lieu d'utilisation (sur ou sous évier en fonction de la taille du filtre), soit à l'entrée s'ils sont associés à d'autres dispositifs de purification ou destinés à traiter toute la quantité d'eau utilisée (**Malvoisin, 2004**).

- **Avantage et Inconvénient:** Ces filtres ont la capacité de supprimer une grande variété de substances organiques. Toutefois, même s'ils sont mordancés au moyen d'argent, ils peuvent toujours être source de contamination bactérielle (**Malvoisin, 2004**).

5.2.les types modernes de system de filtration:

Tableau 04: les types modernes de system de filtration.

Les proceeds	Osmose inverse	Ultrafiltration
Définition	L'osmose inverse est un procédé de purification de l'eau utilisant une membrane semi-perméable et une pression pour éliminer les impuretés et obtenir une eau potable (Axeon wather technologie, 2023).	Définition de l'ultrafiltration (UF) : L'ultrafiltration est un procédé de séparation membranaire . Elle est utilisée en agroalimentaire et en traitement de l'eau, notamment pour la potabilisation et en association avec des procédés biologiques (Belaid & Saifi, 2024).
La forse motrice	Pression 30 à 100 (Boukhiar, 2018).	Pression 3 à 10 (Boukhiar, 2018).
Diameter des pores	Moderne dense (Boukhiar, 2018).	0.01 à 0.1 (Boukhiar, 2018).
Mécanisme	Tout d'abord, l'eau est préfiltrée afin d'éliminer les grosses particules et de protéger la membrane. Ensuite, une pression élevée est appliquée pour forcer l'eau à travers une membrane semi-perméable. Cette membrane ne laisse passer que les molécules d'eau tout en bloquant les sels et les contaminants. Enfin, l'eau purifiée est collectée dans un réservoir de stockage, tandis que les impuretés concentrées sont rejetées (Axeon wather technologie, 2018).	Il fonctionne en forçant l'eau à travers une membrane semi-perméable dotée de très petits pores (0,01–0,1 μm). Ces pores permettent le passage des molécules d'eau et des petites substances dissoutes. Tandis que les particules plus grandes telles que les matières en suspension, les bactéries, les virus et les micro-organismes sont retenues (John woodard, 2018).



CHAPITRE II

***Généralités sur les noyaux de dattes, le
charbon actif et la nanoparticules.***

1. Généralités sur les noyaux de dattes

1.1 La description des dattes:

La datte, provenant du palmier dattier, est un fruit généralement de forme allongée, oblongue ou circulaire. Elle se compose d'un noyau, qui a une texture ferme, entouré de pulpe. La chair ou pulpe de la datte, qui est la partie que l'on peut consommer, est composée de :

- Une enveloppe cellulosique mince appelée peau, également connue sous le nom de péricarpe.
- Un mésocarpe habituellement charnu, dont la consistance varie suivant sa teneur en sucre et qui présente une couleur prononcée.
- Un endocarpe de couleur plus claire et de consistance fibreuse, parfois limité à une enveloppe parcheminée qui entoure le noyau (**Espiard, 2002**).

Selon les variétés, la datte peut mesurer entre 2 et 8 cm de longueur et peser de 2 à 8 grammes. Ils arborent une palette de couleurs allant du blanc légèrement teinté au noir, en incluant des teintes ambre, rouges et brunes de divers degrés d'obscurité (Djerbi) (**Amellal née Chibane, 2008**).

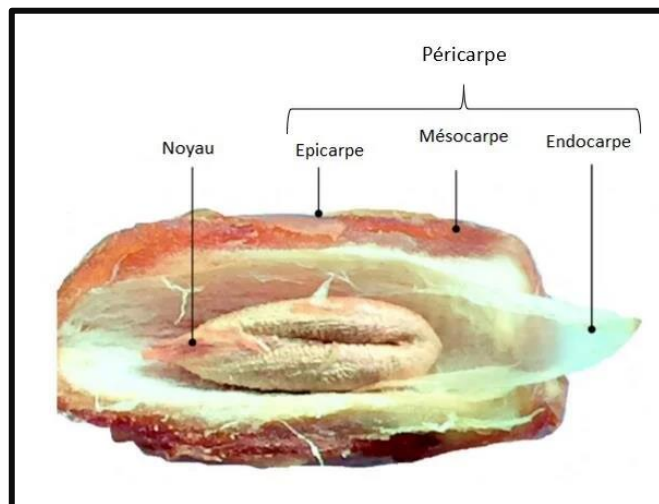


Figure 05: Coupe longitudinale d'une datte (**Ghnimi & Umer, 2017**).

1.2 Classification des dattes selon leur consistance:

La classification des dattes selon leur consistance à maturité distingue trois catégories, initialement établie par des chercheurs américains et validée pour l'ensemble des pays phoenicicoles (Ghazi & Sahraoui, 2005 ; Espiard, 2002) :



Figure 06: Classification des dattes selon leur consistance (Boulal, 2017).

1.3 Définition des noyaux de dattes :

Le noyau de datte est défini comme la partie solide, de forme rectangulaire et pointue à ses deux extrémités, occupant le centre du fruit. Son poids varie entre 0,5 et 4 grammes, sa longueur entre 12 et 20 mm, et sa largeur entre 6 et 15 mm (إبراهيم عودة، 2016).

Sa masse représente entre 10 % et 15 % de la masse totale de la datte et du fruit. Il est riche en substances nutritives (Selim et al., 2022). C'est un produit secondaire abondant, non comestible, une source de biomasse, généralement utilisé comme additif alimentaire dans l'alimentation des moutons et des chameaux dans le désert (Alammar et al., 2022). Le noyau de datte est principalement composé de fibres alimentaires, de protéines, de glucides, de phénols et de minéraux. Ces substances remplissent plusieurs fonctions, agissant d'un point de vue biologique telles que des activités antioxydantes, antibactériennes et antivirales (Mrabet et al., 2020).

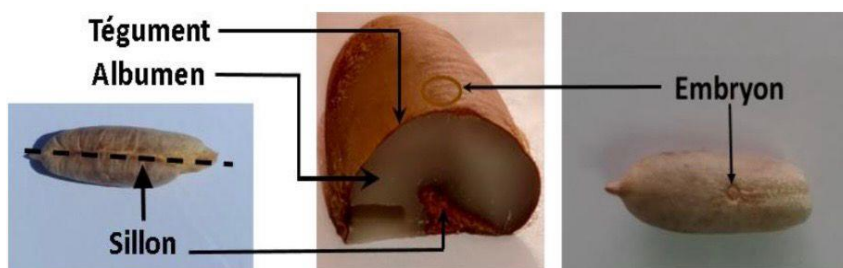


Figure 07 : Noyau de datte du palmier dattier (Benmehdi et al., 2019).

1.4 Composition chimique de noyau des dattes:

Tableau 05: la composition chimique de noyau des dattes

Composant chimique	Proportion (%)	Reference
Fibres	60,47	(Mohammed et al., 2025).
Glucides	19,86	(Mohammed et al., 2025).
Lipides	10-12	(Bouaziz et al., 2008).
Proteines	5,93	(Mohammed et al., 2025).
Ph	6,12	(Khenchelaoui, 2021).
Humidite	65,00	(Khenchelaoui, 2021).

Tableau 06: Teneur en minéraux de noyau des dattes (mg /100g) (Aleid & Haddadin, 2023).

Mineral	Valeur (mg/100g)
Potassuim (K)	214,19 ± 0,51
Phosphore (P)	103,23 ± 0,21
Magnesuim (Mg)	70,68 ± 0,85
Calcuim (Ca)	34,25± 0,15
Soduim (Na)	9,32± 0,07
Fer (Fe)	7,14± 0,03
Zinc (Zn)	1,10 ±0,01
Manganese (Mn)	0,91± 0,01
Cuivre (Cu)	0,28± 0,02

1.5. Valorisation des noyaux de dattes:

1.5.1 Application culinaire de l'huile extraite des noyaux de dattes :

L'huile provenant des noyaux de dattes se caractérise par une concentration élevée en acides gras monoinsaturés, en particulier l'acide oléique. Elle constitue aussi une source remarquable de composés antioxydants solubles dans les lipides, comme les phénols. Elle représente aussi une source précieuse de composés antioxydants liposolubles essentiels, comme les phénols, tocophérols et phytostérols, qui participent à la diminution du risque de plusieurs pathologies.

La méthode d'extraction de l'huile peut se faire de différentes manières, comme à travers la technique du (soxhlet) ou encore l'extraction assistée par ultrason. L'huile de noyaux de dattes, riche en acide oléique et en antioxydants, est une huile alimentaire qui présente une excellente stabilité face au rancissement et aux traitements thermiques. Cette huile est appropriée pour la cuisson, le fritage, l'assaisonnement et peut même servir de substitut à l'huile de palme. Sa forte teneur en caroténoïdes la rend appropriée pour la fabrication de margarine sans colorants artificiels (Mrabet et al., 2020).

1.5.2 Production du charbon actif à partir des noyaux de dattes:

La valorisation des noyaux de dattes du sud algérien pour la production de charbon actif montre que les matériaux obtenus possèdent des propriétés proches de celles des charbons industriels, notamment en termes de surface spécifique et de volume poreux, ce qui les rend adaptés au traitement des eaux.

L'activation chimique est réalisée simultanément à la carbonisation sous atmosphère inerte, à des températures comprises entre 400 et 600 °C, en utilisant des agents tels que des acides de Lewis, l'acide phosphorique ou des bases comme NaOH et KOH. Ces traitements visent à améliorer la capacité d'adsorption et l'affinité pour les ions métalliques.

Le traitement acide permet d'oxyder la surface, d'éliminer les impuretés et d'améliorer l'hydrophilie. Les noyaux de dattes activés à l'acide phosphorique présentent ainsi de bonnes performances adsorbantes. Par ailleurs, leur utilisation pour l'élimination du cobalt des eaux usées a montré une capacité d'adsorption de 6,28 mg, avec un processus exothermique et non spontané (Khenchelaoui, 2021).

1.5.3 Substitut au café sans caféine:

Les extraits de noyaux de dattes, qui ne contiennent pas de caféine et sont riches en composés phénoliques, constituent une option attrayante par rapport au café classique. Ils offrent aux consommateurs la possibilité de savourer le goût du café sans les effets énergisants de la caféine. L'analyse sensorielle de ces extraits a montré une acceptabilité satisfaisante, bien que légèrement inférieure à celle du café arabica (**Ghnimi et al., 2015**).

1.5.4 Valorisation des noyaux de dattes en alimentation des ruminants:

L'augmentation continue des coûts des aliments concentrés à l'échelle mondiale constitue une préoccupation majeure pour les éleveurs de ruminants, les incitant à rechercher des alternatives aux ressources alimentaires conventionnelles. Dans ce contexte, les noyaux de dattes apparaissent comme une option prometteuse.

Toutefois, leur valorisation en alimentation animale nécessite la disponibilité d'équipements technologiques adaptés, notamment des machines capables d'assurer un broyage efficace de cette matière première, dont la dureté peut poser des contraintes techniques lors de sa transformation.

Les résultats de cette étude indiquent que l'incorporation des noyaux de dattes jusqu'à un taux de 20 % dans la ration des chèvres laitières locales est possible. Cette substitution partielle aux concentrés traditionnels ne semble entraîner aucun effet négatif ni sur la santé des animaux ni sur leurs performances de production, ce qui confirme leur potentiel en tant qu'alternative alimentaire durable (**AL-Suwaiegh, 2016**).

2. Généralités sur le charbon actif:

2.1 Définition du charbon actif:

Le charbon actif, parfois appelé charbon actif, désigne tout type de charbon qui a subi une transformation spéciale lui conférant une capacité élevée à adsorber des fluides qui entrent en contact avec lui. C'est une structure amorphe constituée principalement d'atomes de carbone, généralement produite après un processus de carbonisation à haute température. Elle possède une surface spécifique considérable qui lui confère un pouvoir d'adsorption important (**O.S**

Mamane et al., 2016). Le charbon actif constitue principalement un adsorbant doté d'un important volume de pores internes ainsi que d'une surface étendue (**Benaddi, 2000**).

2.2 Les types de charbon actif:

Les charbon actif sont divisés en trois catégories:

- **Le charbon actif en poudre (PAC)** : est une forme très fine de charbon actif, se présentant sous forme de particules de très petite taille (de l'ordre de quelques dizaines de micromètres), ce qui lui confère une surface spécifique très élevée et une forte capacité d'adsorption.

Il est largement utilisé dans le traitement des eaux potables ainsi que dans la dépollution des eaux usées (**Mekarzia, 2000**).



Figure 08:charbon actif en poudre (**Zaabat & Bouferoua, 2025**)

Charbon actif granulaire (CAG): Le charbon actif granulaire (CAG) a une taille moyenne de particules comprise entre 0,6 et 4 mm. Habituellement, il est employé dans les processus d'applications continues en phase liquide et gazeuse. Le CAG présente l'avantage par rapport au CAP d'offrir une chute de pression plus faible ainsi qu'il peut être régénéré et donc réutilisé plus d'une fois (**Khelfaoui, 2025**).



Figure 09: Charbon actif en granule (Zaabat & Bouferoua, 2025)

• **Le charbon actif fabriqué sous forme de fibres:** est un matériau d'origine synthétique ou végétale, obtenu par carbonisation des fibres à des températures élevées. Ce type se distingue par sa structure microporeuse, sa très grande surface spécifique, ainsi que par sa facilité d'utilisation. À l'heure actuelle, le charbon actif fibreux trouve de larges applications dans la fabrication de matériaux composites, de matériaux de friction, ainsi que de matériaux de revêtement isolants résistants aux températures élevées (Ouarnoughi & Amrane, 2025).



Figure 10: Fiber de charbon actif (Zaabat & Bouferoua, 2025)

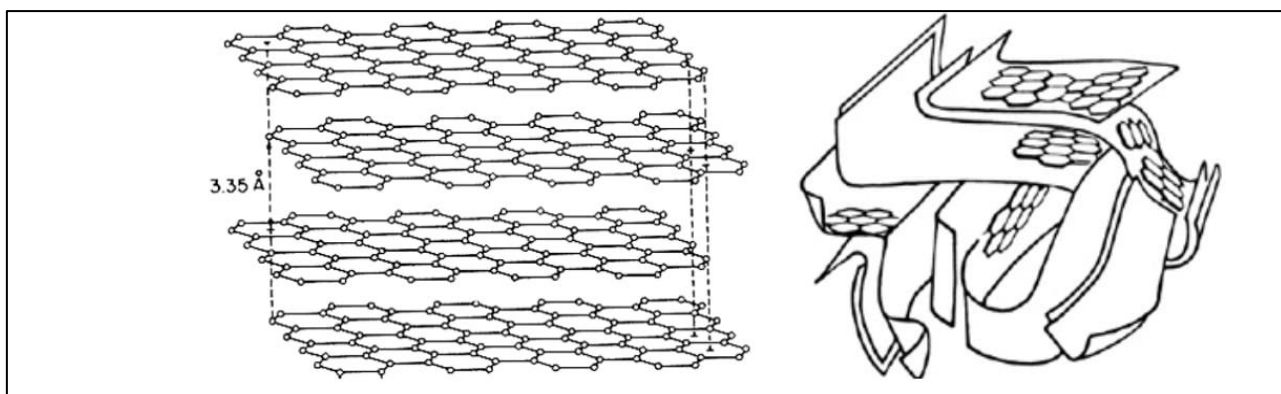
Tableau 07 : Les avantages et les inconvénients des charbon actif (**Husien et al.,2022**).

Types	Avantages	Inconvénients
Charbon actif en poudre (PAC)	Large domaine d'application. Temps de contact réduit grâce à la grande surface spécifique des particules fines.	Coûts relativement élevés. Difficulté de séparation du charbon actif du milieu aqueux après le traitement.
Charbon actif granulaire (GAC)	Facilement utilisable dans les procédés de filtration continue. Ne nécessite pas d'étape complexe de séparation après traitement.	Temps de contact plus long lors du processus d'adsorption. Surface spécifique plus faible par rapport au charbon actif en poub.
Fibres de charbon actif (ACF)	Très grande surface spécifique. Excellente efficacité d'adsorption. Temps de contact très réduit.	Difficultés possibles de séparation de l'adsorbant du milieu liquide après traitement dans certaines applications.

2.3 Les Caractéristiques du Charbon actif:

2.3.1 Structure Microcristalline:

Le carbone activé possède une structure microcristalline qui se forme au cours du processus d'activation. Contrairement au graphite, qui présente également une structure microcristalline, le carbone activé est nettement moins ordonné (voir figure 11). Ce désordre structural est attribué à la présence d'hétéroatomes tels que l'oxygène et l'hydrogène, ainsi qu'à des imperfections localisées à la surface du matériau (**Bertrand, 2011**).

**Figure 11:** Structure microcristalline du graphite et du carbone activé (**Bertrand, 2011**)

2.3.2 Composition Chimique et Groupes de Surface:

La structure chimique de surface du carbone activé influence de manière significative sa capacité d'adsorption. Le carbone activé est constitué de 85% à 95% de carbone, ainsi que d'éléments tels que l'hydrogène, le soufre et l'oxygène.

La composition typique d'un carbone activé classique est la suivante :

Tableau 08 : La composition typique d'un carbone activé classique (**Bertrand, 2011**).

Élément	Proportion
Carbone (C)	88%
Oxygène (O)	6-7%
Soufre (S)	1%
Hydrogène (H)	0.5%
Azote (N)	0.5%

Ces hétéroatomes, présents dans les matières premières ou ajoutés avant la carbonisation, se fixent sur les atomes de carbone et forment des groupes de surface de type :

- Carbone – Oxygène
- Carbone – Hydrogène
- Carbone – Azote
- Carbone – Soufre

Les groupes oxygénés de surface sont de loin les plus abondants et exercent un impact significatif sur les caractéristiques de surface, notamment :

- l'acidité
- la polarité
- la mouillabilité (**Bertrand, 2011**).

2.3.3 Texture du charbon actif:

La texture poreuse d'un charbon actif désigne l'organisation spatiale des particules microscopiques et des pores au sein d'un grain de charbon actif. Cette texture est intimement liée à la nature du précurseur utilisé ainsi qu'aux procédés de préparation appliqués. Elle se

caractérise essentiellement par deux paramètres fondamentaux : la surface spécifique et la porosité (Chaouch, 2014).

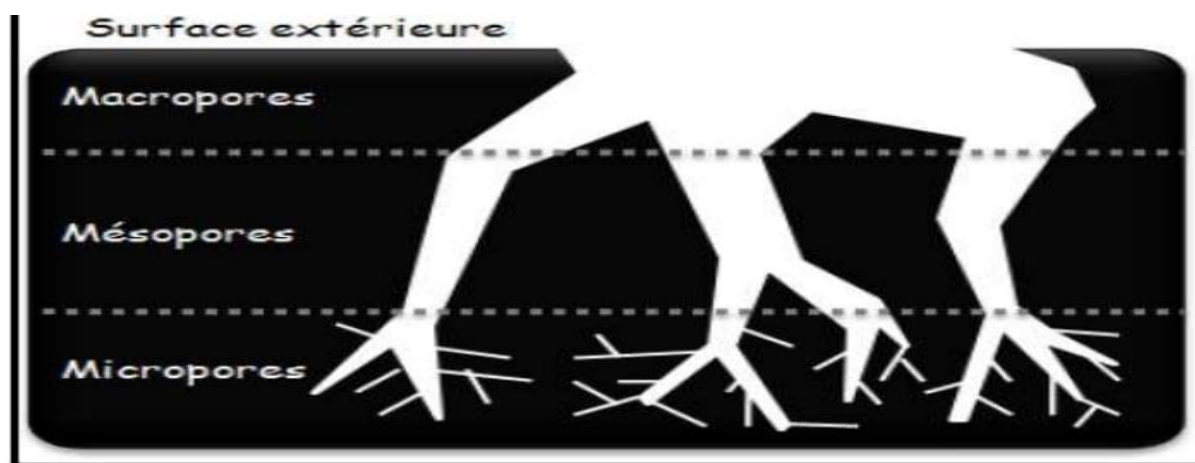


Figure 12: un charbon' Représentation schématique de la structure des pores d Actif obtenu par activation chimique (Bechki, 2018).

2.3.4 La surface spécifique (air massique) :

correspond à la surface totale développée par le charbon actif, prenant en compte l'ensemble des irrégularités existant à l'échelle moléculaire. Exprimée par unité de masse de charbon, elle peut atteindre des valeurs remarquables allant jusqu'à $2700 \text{ m}^2/\text{g}$ (Zaabat & Bouferouna, 2025).

2.3.5 porosité.:

représente quant à elle la fraction volumique de vide présente au sein du charbon actif. Elle peut atteindre 80% et dépend étroitement de la taille des pores ainsi que de leur distribution au sein de la structure. Les pores sont généralement classés en trois catégories selon leurs dimensions, comme le montre le tableau et la figure ci-dessous (Zaabat & Bouferoua, 2025).

Tableau 09: Classification de porosité (Zaabat & Bouferoua, 2025).

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

3. Généralités sur la nanoparticules :

3.1 Définition du nanotechnologie :

La nanotechnologie est une discipline scientifique dédiée à l'étude des matériaux à l'échelle nanométrique (de l'ordre de 10^{-9} mètre). Elle englobe également les techniques de manipulation et de contrôle de la matière au niveau atomique et moléculaire, dans le but d'exploiter les propriétés spécifiques émergentes à cette échelle (**Jordanovska Svetlana, 2015**).

3.2 Définition du nanoparticules:

Une nanoparticule constitue l'unité de base dans la formation des nanostructures. Elle se situe à une échelle intermédiaire, étant significativement plus petite que les objets macroscopiques régis par les lois de la mécanique classique de Newton, tout en restant plus grande qu'un atome ou une molécule individuelle, lesquels sont décrits par les principes de la mécanique quantique (**Jordanovska Svetlana, 2015**).

3.3 Synthèse verte de nanoparticules:

La synthèse des nanoparticules nécessite trois éléments essentiels : un solvant environnement, un agent réducteur efficace et un agent stabilisant non toxique. 'respectueux de l' sont utilisées, notamment les approches physiques, chimiques Plusieurs méthodes de synthèse et biologiques. Cependant, les méthodes chimiques sont souvent coûteuses et peuvent être environnement'polluantes pour l.

En revanche, la synthèse biologique constitue une alternative sûre et écologique, reposant sur l'utilisation des plantes et des micro-organismes, en exploitant les composés phytochimiques comme agents réducteurs et stabilisants.

De manière générale, les méthodes de synthèse des nanoparticules sont classées en deux approches principales : l'approche « bottom-up » (de bas en haut) et l'approche « top-down » (de haut en bas) (**Jardaun et al., 2020**).

3.4 Le rôle des nanoparticules dans la filtration de l'eau:

Les nanomatériaux jouent un rôle important dans le traitement et la purification de l'eau, car ils représentent une alternative prometteuse aux technologies conventionnelles grâce à leur grande efficacité et à leur coût relativement faible. Ils se caractérisent par leur capacité à éliminer efficacement les polluants, les métaux et les composés organiques présents dans l'eau. Les nanoparticules sont également utilisées comme adsorbants, catalyseurs pour la dégradation photochimique des contaminants, ainsi que dans les membranes de nanofiltration. L'utilisation des nanotechnologies contribue à l'amélioration de la qualité de l'eau et offre des solutions durables pour le traitement des eaux, notamment dans les pays en développement. Cependant, certaines préoccupations subsistent concernant les effets environnementaux et sanitaires potentiels des nanoparticules, ce qui nécessite davantage d'études afin de garantir leur utilisation en toute sécurité (Bhattacharya et al., 2013).

3.5 Propriétés des nanomatériaux:

Les nanomatériaux, comme indiqué dans le rapport « Les nanomatériaux : effets sur la santé humaine et sur l'environnement », se caractérisent par un ensemble de propriétés spécifiques qui les distinguent des matériaux conventionnels. Les principales propriétés sont les suivantes :

- **Propriétés mécaniques:**

La structure nanométrique contribue à améliorer les propriétés mécaniques des matériaux, en renforçant notamment leur résistance mécanique (Khemissat & Alloune, 2021).

- **Propriétés électriques:**

Les propriétés électriques des matériaux, en particulier la conductivité, sont influencées par l'incorporation de nanoparticules ou de nanotubes, ce qui entraîne une modification de leur comportement électrique (Khemissat & Alloune, 2021).

- **Propriétés optiques:**

Les nanomatériaux présentent des propriétés optiques particulières. La réduction de la taille des nanoparticules, inférieure aux longueurs d'onde de la lumière visible, peut conduire à une augmentation de la transparence du matériau (Khemissat & Alloune, 2021).

- **Propriétés thermiques:**

La présence de nanoparticules améliore les propriétés de transfert thermique, notamment en augmentant la conductivité thermique des matériaux (**Khemissat & Alloune, 2021**).

- **Propriétés magnétiques:**

Les nanomatériaux cristallins, en particulier ceux de dimension zéro, influencent de manière significative le comportement magnétique des matériaux (**Khemissat & Alloune, 2021**).

- **Propriétés catalytiques:**

Certains nanomatériaux possèdent des propriétés catalytiques, leur permettant d'agir comme catalyseurs dans des réactions chimiques spécifiques, comme les nanoparticules d'or dans la réaction d'oxydation du monoxyde de carbone (CO) (**Khemissat & Alloune, 2021**).

3.6 Caractérisation des nanoparticules:

3.6.1 Caractérisation par spectroscopie UV-Visible:

La spectroscopie UV-visible est une technique d'analyse spectrale qui exploite les interactions entre la matière et les rayonnements électromagnétiques couvrant trois domaines : l'ultraviolet (100–400 nm), le visible (400–750 nm) et le proche infrarouge (750–1400 nm). Son principe repose sur l'absorption du rayonnement par les molécules dans une plage allant de 190 à 800 nm, englobant ainsi l'ultraviolet (190–400 nm) et le visible (400–800 nm).

Grâce à son caractère non destructif et sa rapidité d'exécution, cette technique offre une double utilité : elle permet d'identifier qualitativement la nature des liaisons chimiques présentes dans un échantillon, et de déterminer quantitativement la concentration des espèces absorbantes. Elle est de ce fait largement adoptée en travaux pratiques de chimie ainsi qu'en analyse chimique et biochimique.

Par ailleurs, cette technique s'appuie sur la loi de Beer-Lambert, qui établit que, dans des conditions expérimentales fixées, l'absorbance d'une solution est directement proportionnelle à la concentration de la molécule étudiée, faisant ainsi de la spectroscopie UV-visible un outil de choix pour le dosage précis des espèces en solution (**Mennad & Benguella, 2022**).

3.6.2 Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR):

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) constitue l'une des techniques les plus utilisées pour la caractérisation des nanoparticules, en raison de sa capacité à fournir des informations détaillées sur la composition chimique, la structure moléculaire et les groupes fonctionnels présents à leur surface.

Le principe de cette technique repose sur la mesure de l'absorption du rayonnement infrarouge par les nanoparticules. Lorsque ce rayonnement est dirigé vers l'échantillon, les molécules constitutives des nanoparticules absorbent sélectivement certaines fréquences en fonction de leurs modes de vibration moléculaire. Les spectres d'absorption ainsi obtenus présentent des bandes caractéristiques associées aux différents groupes fonctionnels présents au sein des nanoparticules.

Cette technique permet notamment d'identifier des groupes fonctionnels tels que les groupes hydroxyle (-OH), amine (-NH₂) et carbonyle (C=O), offrant ainsi la possibilité de déterminer la composition chimique des nanoparticules, incluant leurs revêtements de surface et leurs agents de fonctionnalisation.

Par ailleurs, la FTIR permet d'étudier les interactions entre les nanoparticules et d'autres molécules ou matériaux, notamment les interactions nanoparticules-protéines, nanoparticules-polymères et nanoparticules-matrices médicamenteuses, fournissant des informations essentielles sur la stabilité et les propriétés d'interaction des nanoparticules.

Parmi les principales applications de la FTIR dans la caractérisation des nanoparticules, on distingue :

- L'identification des groupes fonctionnels de surface : les groupes fonctionnels jouent un rôle déterminant dans la biocompatibilité, la stabilité et la réactivité des nanoparticules. La FTIR permet de les identifier et d'évaluer leur influence sur les propriétés physicochimiques des nanoparticules.

- L'étude des interactions nanoparticule-biomolécule : la FTIR permet d'analyser les interactions des nanoparticules avec des biomolécules telles que les protéines et l'ADN, ce qui est indispensable pour la conception de nanoparticules destinées aux applications biomédicales.

- Le suivi des modifications de surface : la FTIR permet de caractériser les modifications chimiques apportées à la surface des nanoparticules, dans le but d'améliorer leur biocompatibilité, leur stabilité ou leur capacité de ciblage (**Doudi, 2025**).

3.6.3 Caractérisation par diffraction des rayons X (XRD):

La diffraction des rayons X (XRD) constitue l'une des techniques les plus performantes et les plus répandues pour la caractérisation structurale des matériaux à l'échelle nanométrique. Son principe repose sur l'interférence constructive du rayonnement électromagnétique avec les structures périodiques des matériaux, notamment les réseaux cristallins. Lorsque les rayons X interagissent avec un cristal, ils se diffractent dans des directions spécifiques, et la mesure des angles et des intensités de diffraction permet de déduire avec précision la structure cristalline du matériau étudié.

Dans le cadre de la caractérisation des nanoparticules, la XRD présente un intérêt particulier, car elle permet de déterminer non seulement la phase cristalline et la structure du matériau, mais également d'autres paramètres essentiels tels que la taille des cristallites, la microdéformation et la présence éventuelle de défauts structuraux ou de phases multiples. La taille des cristallites peut être estimée à partir de l'élargissement des pics de diffraction en appliquant la formule de Scherrer, tandis que les déformations et les contraintes internes peuvent être évaluées par diverses méthodes de raffinement des profils de diffraction.

Toutefois, l'application de la XRD aux nanoparticules nécessite une interprétation rigoureuse des données, dans la mesure où la réduction de la taille des particules et les effets de surface peuvent significativement modifier les profils de diffraction obtenus. C'est pourquoi les données issues de la XRD sont généralement analysées en association avec d'autres techniques complémentaires, telles que la microscopie électronique à transmission (MET) et la spectroscopie de dispersion d'énergie des rayons X (EDX), afin d'assurer une caractérisation structurale complète et fiable des nanoparticules (**Doudi, 2025**).

3.7 Applications de la nanotechnologie:

La nanotechnologie englobe un large éventail d'applications dans divers domaines scientifiques et industriels, contribuant à l'amélioration des performances et des propriétés fonctionnelles des matériaux et des systèmes. Les principaux domaines d'application sont les suivants :

- **Domaine médical:**

La nanotechnologie est utilisée dans le développement de systèmes de délivrance ciblée des médicaments, permettant d'acheminer les principes actifs directement vers les cellules ciblées, ce qui augmente leur efficacité tout en réduisant les effets secondaires. Elle joue également un rôle important dans le diagnostic précoce des maladies, notamment le cancer, ainsi que dans l'ingénierie tissulaire et la régénération des tissus (**Malik et al., 2023**).

- **Domaine environnemental:**

Selon **Malik et al. (2023)**, les nanomatériaux sont largement utilisés dans le traitement de l'eau pour éliminer les polluants et les métaux lourds. Ils interviennent également dans la purification de l'air et la réduction des émissions nocives. Les techniques d'adsorption basées sur les nanomatériaux constituent des solutions efficaces dans ce domaine.

- **Domaine de l'énergie:**

La nanotechnologie contribue à l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires et à l'augmentation de leur capacité de conversion énergétique. Elle est également utilisée dans le développement de batteries à haute performance et à grande capacité de stockage, ainsi que dans la production d'énergies propres et durables (**Malik et al., 2023**).

- **Domaine agricole:**

Dans le secteur agricole, la nanotechnologie permet le développement d'engrais et de pesticides nanométriques plus efficaces et moins nocifs pour l'environnement. Elle contribue aussi à l'amélioration de la croissance des plantes, à l'augmentation du rendement agricole et à la détection précoce des maladies végétales (**Malik et al., 2023**).

- **Industrie agroalimentaire:**

Selon **Malik et al. (2023)**, la nanotechnologie est utilisée pour améliorer la qualité et la sécurité des aliments grâce au développement d'emballages intelligents capables de prolonger la durée de conservation et de détecter les contaminations, assurant ainsi une meilleure protection des produits alimentaires.

- **Cosmétiques:**

Les nanoparticules sont intégrées dans les produits cosmétiques, notamment les écrans solaires, afin d'assurer une protection efficace contre les rayonnements ultraviolets. Elles permettent également d'améliorer la pénétration et l'efficacité des substances actives (**Malik et al., 2023**).

- **Domaine industriel:**

Selon **Malik et al. (2023)**, la nanotechnologie permet d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des matériaux, telles que la résistance, la dureté et la résistance à la corrosion, ce qui augmente la durabilité et les performances des produits industriels.

- **Domaine textile:**

Les nanomatériaux sont utilisés dans la fabrication de textiles aux propriétés avancées, tels que la résistance à l'eau, aux taches et aux bactéries, ainsi que dans la conception de textiles intelligents (**Malik et al., 2023**).

- **Secteur des transports:**

Selon **Malik et al. (2023)**, la nanotechnologie contribue à la fabrication de matériaux légers et résistants, ce qui améliore l'efficacité énergétique des véhicules et réduit les émissions. Elle est également utilisée dans les revêtements résistants aux rayures et à la corrosion.

- **Industrie pétrolière:**

Dans le secteur pétrolier, la nanotechnologie est utilisée pour améliorer les procédés d'extraction et augmenter leur efficacité, tout en réduisant la corrosion des équipements et en optimisant les performances des opérations industrielles (**Malik et al., 2023**).

DEUXIÈME PARTIE

Partie Expérimentale



CHAPITRE I

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Introduction:

Ce chapitre décrit les matériaux et les méthodes expérimentales utilisés dans le développement d'un système de filtration des eaux contaminées par des nanoparticules. Le travail repose sur deux types de matériaux : des nanoparticules d'oxyde de zinc dopé (ZnO), et du charbon actif préparé à partir de noyaux de dattes par activation chimique à l'acide phosphorique (H_3PO_4). Les protocoles de préparation, de caractérisation et d'évaluation des performances sont détaillés dans les sections suivantes.

1. Matériels:

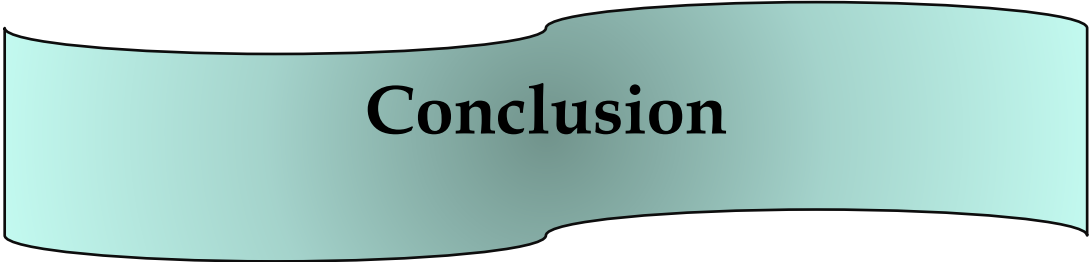


CHAPITRE II

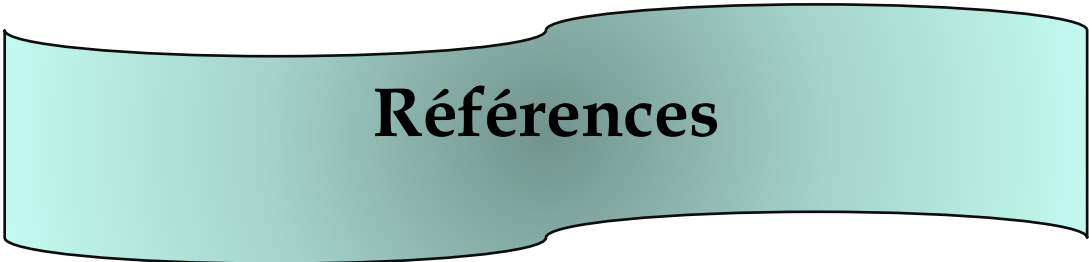
Résultats et discussions.

Introduction:

Dans cette partie, les résultats obtenus à partir des différentes analyses et expérimentations réalisées sur les nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO NPs) ainsi que sur le charbon actif préparé à partir des noyaux de dattes sont présentés et discutés. L'étude de ces résultats vise à évaluer les propriétés physicochimiques des matériaux élaborés ainsi que leur efficacité dans les applications étudiées. La discussion repose sur l'interprétation scientifique des résultats obtenus et leur comparaison avec les données rapportées dans la littérature scientifique.



Conclusion



Références

Références

1. Ouarnoughi, H. W., & Amrane, N. E. (2025). Caractérisation et efficacité d'un charbon actif poreux pour l'élimination du Acide 3-indole Acétique en solution aqueuse [Mémoire de Master Académique, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem].
2. .Seven Seas News Team. (2024, December 19). How water reuse enhances food security in agriculture. Seven Seas Water Group.
3. .Rejesk, F. (2002). Analyse des eaux : aspects réglementaires et techniques. Centre Régional de Documentation Pédagogique d'Aquitaine, France.
4. Alammar, A., Hardian, R., & Szekely, G. (2022). Upcycling agricultural waste into membranes: From date seed biomass to oil and solvent-resistant nanofiltration. *Green Chemistry*, 24, 365–374.
5. Aleid, S. M., & Haddadin, J. S. (2023). Valorization and chemical constituents assessments of Khalas dates fruit, syrup and seeds. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 11(1), 77–87.
6. Al-Suwaiegh, S. B. (2016). Effect of feeding date seeds on milk production, composition and blood parameters of lactating Ardi goats. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 29(4), 509.
7. Amellal née Chibane, H. (2008). Aptitude technologiques de quelques variétés communes de dattes : Formulation d'un yaourt naturellement sucré et aromatisé [Mémoire de Doctorat, Université M'hamed Bougara de Boumerdes].
8. Atinkpahoun, N. C. H. (2018). Relations entre la variabilité de la pollution des eaux usées urbaines et les contextes géographiques, socio-économiques et culturels au Bénin et en France [Thèse de doctorat, Université de Lorraine & Université d'Abomey-Calavi]. HAL open science.
9. AXEON Water Technologies. (2023,September 22). What is reverse osmosis and how does it work?
10. Bali, M. (2024). Traitement des eaux usées [Licence, Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux, Université de Gabès]. HAL Open Science.
11. Beaupoil, A., Le Borgne, C., Moussa Atto, A., Mucig, C., & Roux, A. (2010). Risques sanitaires de réutilisation des eaux usées traitées pour l'aéro-aspiration des espaces verts. IGS/PERSAN, École des Hautes Études en Santé Publique (EHESP). 63 p.

12. Bechki, M. K. (2018). Préparation et caractérisation du charbon actif à partir des noyaux du palmier dattier et des coquilles des noix [Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah – Ouargla]. Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière, Département de Chimie.
13. Bedida, N., Berkan, L., & Choughrem, A. (2024). Nanoparticle-based nutritional supplement aided by moringa leaf extract: a therapeutic approach for deltamethrin-induced liver disease [Master's thesis, University of El Oued]. Faculty of Natural and Life Sciences, Department of Cellular and Molecular Biology.
14. Belaid, R., & Saifi, M. (2024). Analyse et diagnostic de la station RO de traitement de l'eau d'alimentation des chaudières à l'aide du simulateur WAVE [Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar - Annaba, Faculté de Technologie, Département de Génie des Procédés].
15. Ben Achou, N., & Chouireb, G. (2022). Traitement des eaux usées urbaines, par la technique d'infiltration-percolation sur filtre à sable cas commune de Berriane (Ghardaïa) [Mémoire de master, Université de Ghardaïa]. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre, Département de Biologie.
16. Benaddi, H., Bandosz, T. J., Jagiello, J., Schwarz, J. A., Rouzaud, J. N., Legras, D., & Béguin, F. (2000). Surface functionality and porosity of activated carbons obtained from chemical activation of wood. *Carbon*, 38, 669–674.
17. BENCHRIRAT, A. (2024). Impact de la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation des terres agricoles en Algérie (Tlemcen) [Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen]. DSpace Université de Tlemcen.
18. BENMEHDI, E., MEBARKI, R., & BOULAL, A. (2019). Valorisation des noyaux de dattes par production de bioénergie dans la région d'Adrar [Diplôme de doctorat en science]. Université Ahmed Draïa-Adrar.
19. Bertrand, N. (2011). Caractérisation électrique, mise en évidence des phénomènes physico-chimiques et modélisation fractionnaire des supercondensateurs à électrodes à base de carbone activé [Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1].
20. Bhattacharya, S., Saha, L., Mukhopadhyay, A., Chattopadhyay, D., Ghosh, U. C., & Chatterjee, D. (2013). Role of nanotechnology in water treatment and purification: Potential applications and implications. *International Journal of Chemical Science and Technology*, 3(3), 59–64.
21. Bouarroudj, T., Aoudjit, L., Nessaibia, I., Zioui, D., Messai, Y., Bendjama, A., Mezrag, S., Chabbi, M., & Bachari, K. (2023). Enhanced photocatalytic activity of Ce and Ag co-doped ZnO nanorods of paracetamol and metronidazole antibiotics co-degradation in wastewater

- promoted by solar light. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 97(5), 1074–1087.
<https://doi.org/10.1134/S0036024423050278>
22. Bouaziz, M. A., Besbes, S., Blecker, C., Wathelet, B., Deroanne, C., & Attia, H. (2008). Protein and amino acid profiles of Tunisian Deglet Nour and Allig date palm fruit seeds. *Fruits*, 63(1), 37–43.
23. Bouhamed, F., Elouear, Z., & Ouddane, B. (2016). Multi-component adsorption of copper, nickel and zinc from aqueous solutions onto activated carbon prepared from date stones. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 15801–15806.
24. Boukhiar, S. (n.d.). Caractérisation des membranes d'ultra filtration: Application au dessalement et a la concentration de jus de fruit [Mémoire de Master, Université Hassiba Ben Bouali- Chlef, Faculté de Technologie, Département de Génie des Procédés].
25. Boulal, A. (2017). Contribution à l'étude de la microflore des dattes conservées par des méthodes traditionnelles (Btana), et valorisation des dattes de faible valeur marchande [Thèse de Doctorat en Biologie, Université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella].
26. Boumalek, W. (2020). Etudes des possibilités de valorisation agricole des sous-produits d'épuration et l'amélioration de la gestion des processus épuratoires d'une station d'épuration [Thèse de doctorat LMD, Hydraulique]. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
27. Brishti, R. S., Habib, M. A., Ara, M. H., Karim, K. M. R., Islam, M. K., Naime, J., Rumon, M. M. H., & Khan, M. A. R. (2024). Green synthesis of ZnO NPs using aqueous extract of *Epipremnum aureum* leave: Photocatalytic degradation of Congo red. *Results in Chemistry*, 7, 101441. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101441>
28. Cardot C, 2010. Le traitements. de l'eau pour l'ingénieur procédés physico-chimiques et biologiques cours et problèmes résolus génie de l'environnement. Ed. Ellipses. 302p.
29. Chaouch, N. (2014). Utilisation des sous-produits du palmier dattier dans le traitement physico-chimique des eaux polluées [Thèse de doctorat en sciences, spécialité chimie]. Université Hadj Lakhdar – Batna.
30. ChianitiSofien, (2015), Optimisation de la bioproduction d'éthanol par valorisation des refus de l'industrie de conditionnement des dattes (Université Rennes 1). July 2015.
31. Doudi, D. (2025). Synthèse, caractérisation et activités biologiques des nanoparticules préparées à base de noyaux de dattes des palmiers dattier (*Phoenix dactylifera*) [Thèse de doctorat, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued].
32. Doudi, D. (2025). Synthèse, caractérisation et activités biologiques des nanoparticules préparées à base de noyaux de dattes des palmiers dattier (*Phoenix dactylifera*) [Thèse de doctorat, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued].

33. Elewa, A. M., Amer, A. A., Attallah, M. F., Gad, H. A., Al-Ahmed, Z. A. M., & Ahmed, I. A. (2023). Chemically activated carbon based on biomass for adsorption of Fe(III) and Mn(II) ions from aqueous solution. *Materials*, 16(3), 1251.
<https://doi.org/10.3390/ma16031251>
34. Elgaroui, H. (2017). Synthèse d'un charbon actif à partir des noyaux de dattes (Ghars) et son application dans le traitement eaux usées (l'abattoir) de la région de Metlili [Mémoire de Master, Université de Ghardaïa].
35. F.N.S.A. (Fédération Nationale des Syndicats de l'Assainissement et de la maintenance industrielle). (2009). Panorama des techniques de traitement des déchets d'assainissement, matières de vidange, déchets gras et déchets sableux. 60 p.
36. Genesis Water Tech. (2023, 7 septembre). Principes de décodage du traitement des eaux usées industrielles. Genesis Water Technologies.
37. Ghania, A., & Djahra, A. B. (2023). Protective and antioxidant capacity of date palm seeds (*Phoenix dactylifera* L.) on hepatotoxicity in rats. *Farmacia*, 71(2), 303-311.
38. Ghnimi, S., Almansoori, R., Jobe, B., Hassan, M. H., & Kamal-Eldin, A. (2015). Quality evaluation of coffee-like beverage from date seeds (*Phoenix dactylifera*, L.). *Arab Journal of Food Processing and Technology*, 6(12), 1-6.
39. Ghnimi, S., Umer, S., Karim, A., & Kamal-Eldin, A. (2017). Date fruit (*Phoenix dactylifera* L.): An underutilized food seeking industrial valorization. *NFS Journal*, 6, 1-10.
40. Golonu, S. (2021). Etude mécanistique et élaboration de photocatalyseurs performants pour la modification sélective des sucres libres [Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne]. TEL Thèses en ligne. <https://theses.hal.science/tel-03941261v1>
41. Gupta, K., Sharma, B., Garg, V., Neelratan, P. P., Kumar, V., Kumar, D., & Sharma, S. K. (2024). Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue and methyl orange using biogenic ZnO NPs synthesized via *Vachellia nilotica* (Babool) leaves extract. *Hybrid Advances*, 5, 100160. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100160>
42. Habtemariam, T. H., Anjullo, S. H., & Abebe, G. M. (2026). Green synthesis and antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles using *Croton macrostachyus* Hochst. ex Delile extracts. *RSC Advances*. Publication en ligne anticipée.
43. Hafiane, R. (2024). Traitement des eaux usées domestiques de la station d'épuration de Houd Berkouli par charbon actif [Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie des Procédés].
44. Hammadi, B. (2017). Lagunage aéré en zone aride performances épuratoires, paramètres influents : Cas de la région de Ouargla [Thèse de doctorat en sciences, spécialité chimie].

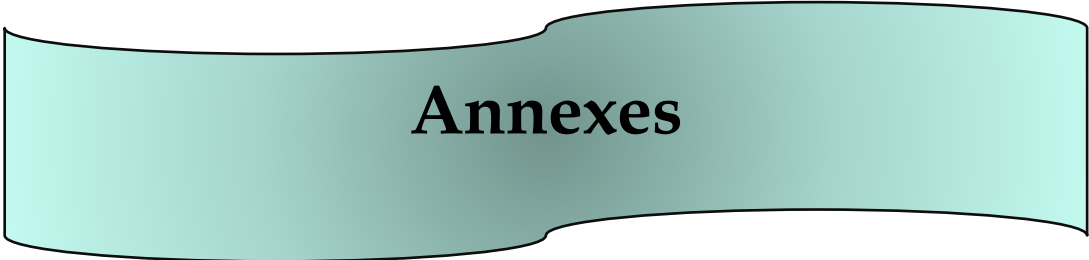
- Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté de Mathématique et Sciences de la Matière, Département de Chimie.
45. Husien, S., El-taweel, R. M., Salim, A. I., Fahim, I. S., Said, L. A., & Radwan, A. G. (2022). Review of activated carbon adsorbent material for textile dyes removal: Preparation, and modelling. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100325>
46. ICDD. (2024). Powder Diffraction File (PDF) Card No. 48-1548: Zinc Oxide (ZnO), Wurtzite structure. International Centre for Diffraction Data. <https://www.icdd.com>
47. Ikhlef, H., & Meghnia, N. (2024). Application de systèmes amphiphiles à l'élimination de contaminants organiques d'un milieu aqueux [Mémoire de Master, Université Saad Dahleb, Blida 1].
48. Jadoun, S., Arif, R., Jangid, N. K., & Meena, R. K. (2020). Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: A review. *Environmental Chemistry Letters*.
49. Jaishi, D. R., Ojha, I., Bhattarai, G., Baraili, R., Pathak, I., Ojha, D. R., Shrestha, D. K., & Sharma, K. R. (2024). Plant-mediated synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles using *Alnus nepalensis* D. Don for biological applications. *Heliyon*, 10, e39255. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39255>
50. Jones, N., Ray, B., Ranjit, K. T., & Manna, A. C. (2008). Antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions on a broad spectrum of microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, 279(1), 71–76.
51. Kendouci, M. A. (2018). Etude de risque de pollution des eaux souterraines de la ville de Béchar et valorisation du sable en vue de son utilisation en traitement des eaux usées [Thèse de doctorat]. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB).
52. Kerch, G., & Vernus, E. (2001). Toxicité des métaux. *Techniques de l'Ingénieur*, G2450, 1–17.
53. Khalid, S., Shahid, M., Natasha, Bibi, I., Sarwar, T., Shah, A. H., & Niazi, N. K. (2018). A review of environmental contamination and health risk assessment of wastewater use for crop irrigation with a focus on low and high-income countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 895.
54. Khao, T., Gembo, R. O., Odisitse, S., & King'onde, C. K. (2025). Fabrication of ZnO nanoparticles using marula (*Sclerocarya birrea*) leaf extract for catalytic degradation of rhodamine 6G and methylene blue dyes under UV light irradiation. *Next Materials*, 7, 100366. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2024.100366>

55. Khelfaoui, A. (2025). Utilisation des déchets solides du palmier dattier pour le traitement des eaux usées phénoliques [Thèse de doctorat LMD, Université Kasdi Merbah – Ouargla].
56. Khemissat, G., & Alloune, M. (2021). Synthèse verte et caractérisation des nanoparticules à l'aide de l'extrait de menthe [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
57. Khemissat, G., & Alloune, M. (2021). Synthèse verte et caractérisation des nanoparticules à l'aide de l'extrait de menthe [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla].
58. Khenchelaoui, S. (2021). Valorisation des noyaux issus des différentes variétés de dattes dans le traitement des effluents industriels [Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique].
59. Kherroubi, F., & Ouezzani, S. (2022). Mise en valeur des noyaux de dattes [Mémoire de fin d'études, Université Kasdi Merbah Ouargla].
60. LADJEL, F. (2006). Exploitation d'une station d'épuration à boue activée niveau 02. Centre de formation au métier de l'assainissement. CFMA-Boumerdes.
61. Lambiasi, L., Ddiba, D., Andersson, K., Parvage, M., & Dickin, S. (2024). Greenhouse gas emissions from sanitation and wastewater management systems: A review. *Journal of Water and Climate Change*, 15(4), 1797.
62. Laperche, D. (2019, 11 juin). Eutrophisation des masses d'eau : l'Etat demande une révision rapide des zones sensibles. *Actu-Environnement*.
63. Lyou, S., & Kameli, R. (2021). Caractérisation Physico-Chimique Et Bactériologique Des Rejets D'eaux Usées De La Ville De Ghazaouet (Algérie) [Mémoire de Master, Hydraulique Urbaine]. Centre Universitaire de Maghnia, Institut des Sciences et de la Technologie.
64. Macías-García, A., García-Sanz-Calcedo, J., Carrasco-Amador, J. P., & Segura-Cruz, R. (2019). Adsorption of paracetamol in hospital wastewater through activated carbon filters. *Sustainability*, 11(9), 2672.
65. Malik, S., Muhammad, K., & Waheed, Y. (2023). Nanotechnology: A revolution in modern industry. *Molecules*, 28(2), 661. <https://doi.org/10.3390/molecules28020661>
66. Malvoisin, A. (2004). Contrôle de l'efficacité et de l'innocuité des appareils de traitement d'eau domestiques [Mémoire d'Ingénieur du Génie Sanitaire]. École Nationale de la Santé Publique (ENSP), Rennes ; Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).
67. Maref, N. (2019). Traitement et épuration des eaux : Cours et exercices [Polycopié de cours]. Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, Faculté de Technologie, Département d'Hydraulique.

68. Mekarzia, A. (2000). Utilisation de charbon actif préparé à partir de marc de café dans le traitement et l'épuration des eaux [Thèse de Magister, École Nationale Polytechnique d'Alger].
69. Mennad, C., & Benguella, L. (2022). Synthèse biologique des nanoparticules [Mémoire de Master en Chimie appliquée, Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem].
70. Ministère de l'environnement de l'eau et de l'agriculture. (2026, janvier 16). Approbation de la mise à jour des normes et spécifications des eaux usées traitées (Décision n° 45138516). Journal Officiel, n° 5140.
71. Mohammed, A. A., Al-Suwaiegh, S., AlGherair, I., Al Sornokh, H., & Mohammed, M. A. (2025). Potential impact of dietary and water extract date seeds consumption on health profiles in mice. *Indian Journal of Animal Research*. Publication en ligne anticipée.
72. Mohan, N. S., Arulraj, A., Mangalaraja, R. V., Anitha, R., & Vijayalakshmi, V. (2024). Investigating the effect of nickel concentration on the photocatalytic activity of ZnO photocatalysts for methylene blue dye degradation prepared via facile green synthesis method. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100802.
<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100802>
73. Mohapatra, S., Panda, N., & Pramanik, P. (2009). Boronic acid functionalized superparamagnetic iron oxide nanoparticle as a novel tool for adsorption of sugar. *Materials Science and Engineering C*, 29(7), 2254–2260.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2009.05.017>
74. Mouni, L., Merabet, D., Bouzaza, K., & Belkhiri, L. (2010). Removal of Pb^{2+} and Zn^{2+} from the aqueous solutions by activated carbon prepared from Dates stone. *Desalination and Water Treatment*, 16, 1–8.
75. Mrabet, A., Jiménez-Araujo, A., Guillén-Bejarano, R., Rodríguez-Arcos, R., & Sindic, M. (2020). Date seeds: A promising source of oil with functional properties. *Foods*, 9(6), 787.
76. Nasab, N. K., Sabouri, Z., Ghazal, S., et Darroudi, M. (2020). Green-based synthesis of mixed-phase silver nanoparticles as an effective photocatalyst et investigation of their antibacterial properties. *Journal of Molecular Structure*, 1203, 127411.
77. Natsheh, B. (2021). Impact of short term irrigation with different water types on some chemical and physical soil properties. *Open Journal of Soil Science*, 11, 389–401.
78. Ooali, M. (2001). Cours de procédés unitaires biologiques et traitements des eaux. Office des Publications Universitaires, Blida. 52 p.

79. Ouakouak, A. K., & Youcef, L. (2016). Adsorption des ions Cu^{2+} sur un charbon actif en poudre et une bentonite sodique. *Larhyss Journal*, 27, 39–61.
80. Ouled Mokhtar, F. (2019). Etude de la possibilité d'utilisation des eaux épurées pour l'irrigation (cas de la station d'El Goléa) [Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah – Ouargla].
81. Ousmaila Sanda Mamane, Adamou Zanguina, Ibrahim Daou, & Ibrahim Nataton. (2016). Préparation et caractérisation de charbons actifs à base de coques de noyaux de *Balanites Aegyptiaca* et de *Zizyphus Mauritiana*. *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*, 41, 59–67.
82. Sayem, Md. A., Suvo, Md. A. H., Syed, I. M., & Bhuiyan, M. A. (2024). Effective adsorption and visible light driven enhanced photocatalytic degradation of rhodamine B using ZnO nanoparticles immobilized on graphene oxide nanosheets. *Results in Physics*, 58, 107471. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107471>
83. Sedira, N. (2013). Etude de l'adsorption des métaux lourds sur un charbon actif issu de noyaux de dattes [Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia Souk-Ahras].
84. Sékirifa, M. L. (2013). Étude des propriétés adsorbantes des charbons activés issus des noyaux de dattes : Application au traitement d'effluent aqueux [Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla].
85. Selim, S., Abdel-Mawgoud, M., Al-Sharary, T., Almuhayawi, M. S., Alruhaili, M. H., Al Jaouni, S. K., Warrad, M., Mohamed, H. S., Akhtar, N., & AbdElgawad, H. (2022). Seeds of date palm: Bioactive composition, antibacterial activity and antimutagenicity potentials. *Agronomy*, 12(54).
86. Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., Hasan, H., & Mohamad, D. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters*, 7(3), 219–242.
87. Tabet, M. (2015). Étude physico-chimique et microbiologique des eaux usées et évaluation du traitement d'épuration [Thèse de Doctorat 3ème cycle en Sciences Biologiques, option Santé, Eau et Environnement]. Université 8 Mai 1945-Guelma, Laboratoire de Biologie, Eau et Environnement.
88. Upadhyaya H, Shome S, Sarma R, Tewari S, Bhattacharya M K and Panda S K (2018) Green synthesis, characterization and antibacterial activity of ZnO nanoparticles. *American Journal of Plant Sciences* 6:1279-1291.

89. Woodard, J. (2018, July 27). What is ultrafiltration? How an ultrafiltration membrane works. Fresh Water Systems.
90. WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2017). The United Nations World Water Development Report 2017: Wastewater – The Untapped Resource. UNESCO.
91. Yahiaoui, K. (2020). La Gestion et le traitement des eaux usées [Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem].
92. Zaabat, K., & Bouferoua, A. (2025). Valorisation des noyaux de dattes (Ghars) dans le domaine de traitement des eaux [Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla]. Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie des Procédés.
93. الطائي، س. إ. خ. (2017). تحضير أنواع جديدة من الكربون المنشط واختبار كفاءتها من خلال امتزاز بعض الأصباغ عليها: دراسة ثيرمودايناميكية وحركية [أطروحة دكتوراه، جامعة الموصل].
94. عبد الكريم، خ. م.، & أمهني، ص. أ. (2021). دراسة أثر مياه الصرف الصحي غير المعالجة على بعض خواص التربة في منطقة أجدابيا – ليبيا. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، 2(12).
95. عودة إبراهيم، ع. (2016). نوى التمر تركيبها واستخداماتها. الشبكة العراقية لنخلة التمر.



Annexes

Annexes



Une etuve.



Un four a moufle.



Une centrifugeuse.



Un ph-metre.



Une balance analytique.



Une plaque chauffante.



Un appareil de spectroscopie uv-visible



Analyseur biochimique automatique
mindray bs-240.



Un appareil à ultrasons.



Un bec Bunsen.