

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2022



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع...../2022

Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : hydraulique urbaine

Thème :

**Etude des performances du charbon actif pour l'élimination
d'un anti-inflammatoire stéroïdien en solution synthétique**

Nom et Prénom de l'étudiant

M^{LLE}. GUEDIDA Abla

Encadreur : Pr. OUNOKI Samira

Co-encadreur : M^{lle} .CHEBBI Meriem

Année universitaire : 2021 - 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

*Tout d'abord je remercie vivement Le Bon Dieu de m'avoir
donnée la force et le courage pour accomplir ce travail.*

*Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de recherche en
hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS), à l'université
de Biskra, sous la direction de Professeur **GUERGAZI Saâdia***

Je vous remercie Madame pour votre accueil.

*Un grand merci à ma superviseuse «Pr. **OUNOKI Samira** »
pour sa présence, sa rigueur, ses encouragements, et pour les
précieus commentaires qu'elle m'a apportés lors des différents
suivis, ce qui m'a permis de présenter mon travail dans sa forme
définitive.*

Je vous remercie, Madame.

*Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements
aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer et juger cet
humble travail.*

*Mes vifs remerciements s'adressent également à **M^{lle} CHEBBI
Meriem** pour son aide, ses conseils et sa collaboration pour
faire un bon travail*

*Nous tenons également à remercier nos professeurs pour
l'enseignement que nous avons reçu.*

*A la fin nous disons merci à tous ceux qui ont participé avec
nous dans ce travail du début à la fin.*

Merci à tous





Dédicace

*Je dédie ce travail à mes
parents, frères, sœurs et leurs
familles, et à mes chers
enseignants (Ounoki,
mimech, Guergazi, sgheri,
yousf, masmoudi, charhabile)
sans oublier tous mes
collègues tout au long de ma
période d'études et mes amis,
en particulier Missaibi Salim,
A Noura et sa famille, Arfaoui
et sa famille, B fateh, C Ilyas,
M Tofik, B Muman, Warda,
Rabia, Najwa, Sabah, Malika,
Zineb , Nadjiba et Solif.
Et tous ceux que nous aimons.*

Merci à tous

Résumé

En Algérie, les ressources en eau de bonne qualité sont rares et menacées par des rejets domestiques, industriels et agricoles. Les résidus des médicaments sont parmi les polluants les plus inquiétants en raison de leur persistance, leur caractère récalcitrant et leur toxicité. La présente étude a visé la détermination des performances du charbon actif en poudre pour l'élimination d'un anti-inflammatoire stéroïdien, prédnisolone, fortement consommé au niveau national durant la deuxième vague de la pandémie Covid-19. Afin d'optimiser le processus d'adsorption, diverses conditions opératoires ont été manipulées à savoir l'effet du temps de contact, la vitesse d'agitation, le pH, la teneur en CAP et la concentration initiale en médicament. Les résultats obtenus ont mis en évidence la bonne rétention de prédnisolone sur le charbon actif avec un temps d'équilibre de 60 minutes et un rendement maximal de 98%. Le modèle pseudo-premier-ordre s'adapte parfaitement avec la cinétique d'adsorption de prédnisolone, et l'isotherme de Langmuir décrit parfaitement l'élimination de l'anti-inflammatoire étudié sur le CAP.

Mots clés : anti-inflammatoire, prédnisolone, adsorption, charbon actif, pH.

المخلص:

تعتبر الموارد المائية عالية الجودة في الجزائر نادرة ومهددة بالمخلفات السائلة المنزلية، الصناعية والزراعية. تثير مخلفات الأدوية الكثير من القلق بسبب تواجدها الدائم في المياه، مقاومتها لتقنيات المعالجة وسميتها. تهدف الدراسة الحالية إلى تحديد فعالية مسحوق الكربون النشط لإزالة مضادات الالتهاب الستيرويدية، بريدنيزولون، التي تم استهلاكها بكثرة على المستوى الوطني خلال الموجة الثانية من جائحة كوفيد-19. من أجل تحسين عملية الامتزاز، تم تغيير العوامل التجريبية، وهي تأثير زمن التفاعل، سرعة التحريك، درجة الحموضة الوسط، تركيز الفحم النشط، والتركيز الأوليلدواء. أظهرت النتائج المتحصل عليها الالتقاط الجيد للبريدنيزولون على الكربون النشط بزمن توازن قدره 60 دقيقة ومردود إزالة أقصى قدره 98%. كما أظهرت النتائج أن نموذج الشبه الدرجة الأولى (pseudo-premier-ordre) يتناسب تمامًا مع نتائج تأثير زمن التفاعل على امتزاز البريدنيزولون، ويتوافق قانون لانجموير (Langmuir) بشكل مثالي مع إزالة مضادات الالتهاب عن طريق الامتزاز على الفحم النشط.

الكلمات المفتاحية: مضادات الالتهاب، البريدنيزولون، الامتزاز، مسحوق الكربون المنشط، درجة الحموضة

Abstract :

In Algeria, good quality water resources are rare and threatened by domestic, industrial and agricultural discharges. Drug residues are among the most worrying pollutants due to their persistence, recalcitrance and toxicity. The present study aimed to determine powdered activated carbon's performances for the removal of a steroidal anti-inflammatory, prednisolone, widely consumed at the national level during the second wave of the Covid-19 pandemic. In order to optimize the adsorption process, various operating conditions were manipulated; especially contact time's effect, stirring speed, pH, powdered activated carbon content and initial drug concentration. The obtained results showed the good retention of prednisolone on activated carbon with an equilibrium time of 60 minutes and a maximum yield of 98%. The pseudo-first-order model fits perfectly with the adsorption kinetics of prednisolone, and the Langmuir isotherm impeccably describes the elimination of the anti-inflammatory studied on powdered activated carbon.

Keywords: anti-inflammatory, prednisolone, adsorption, activated carbon, pH.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Généralités sur les anti-inflammatoires

I.1 Introduction	3
I.2 Types des anti-inflammatoires et leur consommation	3
I.2.1 Les anti-inflammatoires non stéroïdiens	3
I.2.1.1 Principaux effets indésirables.....	3
I.2.1.2 Mécanisme d'action des AINS	5
I.2.2 Les anti-inflammatoires stéroïdiens (corticoïdes).....	5
I.2.2.1 Classification deux groupes de corticoïdes.....	6
I.2.2.2 Prescription et surveillance des anti-inflammatoires stéroïdiens	6
I.2.2.3 Mécanismes d'action anti-inflammatoire des corticoïdes	6
I.2.2.4 Effet anti-inflammatoire des stéroïdiens.....	7
I.3 Provenance des produits pharmaceutiques	7
I.4 Présence des anti-inflammatoires dans les eaux	8
a. Eau de surface.....	8
b. Eau souterraine	9
c. Eaux potables.....	10
d. Eaux usées	11
I.5 Les produits pharmaceutiques dans les eaux Algériennes.....	12
I.6 Toxicité des anti-inflammatoires	13
I.7 Caractéristiques du Prédnisolone	13
Conclusion.....	14

CHAPITRE II : Données de base sur la technique d'adsorption

II.1 Introduction.....	15
II.2 Généralités sur l'adsorption	15
II.2.1 Définition de l'adsorption	15
II.2.2 Types d'adsorption	16

• Adsorption physique	16
• Adsorption chimique.....	16
II.3 Description des étapes d'adsorption	17
II.3.1 Facteurs influençant l'adsorption	18
II.3.1.1 Surface spécifique.....	19
II.3.1.2 Le pH	19
II.3.1.3 La température	19
II.3.1.4 La masse de l'adsorbant	19
II.3.2 La cinétique d'adsorption	20
II.3.2.1 Modélisation de la cinétique d'adsorption	20
✚ Modèle cinétique du pseudo -first- ordre (PFO).....	20
✚ Modèle de pseudo -second- ordre (PSO).....	21
✚ Modèle de diffusion externe	21
✚ Modèle d'Elovich	22
✚ Modèle de diffusion dans le film liquide	22
✚ Modèle de diffusion intra particulaire	23
II.4 Modélisation mathématique dans l'adsorption	23
II.4.1 Isothermes d'adsorption	23
II.4.1.1 Classification des isothermes d'adsorption	23
a. Classe S.....	24
b. Classe L.....	24
c. Classe H.....	24
d. Classe C.....	25
II.4.1.2 Modélisation des isothermes d'adsorption	25
✚ Modèle de Langmuir	25
✚ Modèle de Freundlich.....	25
✚ Modèle de Temkin	26
✚ Isotherme de Brunauer, Emmett, Teller (BET)	26
✚ Modèle de Dubinin – Radushkevich (D-R)	27
II.5 Les charbons actifs	27
II.5.1 Introduction	27
II.5.2 Définition charbon actif	27
II.5.3 Les différentes formes du charbon actif	28
a. Charbon actif en grain (CAG)	28
b. Le charbon actif extrudé.....	29
c. Charbon actif en poudre (CAP)	29

II.5.4	Nature chimique de la surface d'un charbon activé	30
II.5.5	Propriété texturales	31
II.5.6	Propriétés de charbon actif	32
II.5.7	Avantages et les inconvenantes du charbon actif	33
II.5.8	Principales applications	33
II.5.9	Applications des charbons actifs dans le domaine de l'adsorption	34
II.6	Elimination des produits pharmaceutiques par l'adsorption	34
a.	Adsorption du paracétamol.....	34
b.	Adsorption de l'ibuprofène.....	35
c.	Adsorption du l'amoxicilline.....	35
d.	Adsorption du diclofénac sodique.....	35
e.	Adsorption du métronidazole.....	36
f.	Adsorption de la pénicilline G.....	36
	Conclusion	36

CHAPITRE III : Méthodologie expérimentale

III.1	Introduction.....	37
III.2	Dispositifs expérimentaux.....	37
III.3	Produits chimiques et préparation des solutions.....	40
III.4	Dosage du prédnisolone	41
III.5	Milieu de dilution.....	41
III.6	Description des tests d'adsorption du prédnisolone sur charbon actif	41
III.7	Conclusion.....	42

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

IV.1	Introduction	43
IV.2	Adsorption du prédnisolone sur charbon actif en solutions synthétiques.....	43
IV.2.1	Effet du temps de contact.....	43
IV.2.2	Effet de la vitesse d'agitation	45
IV.2.3	Effet du pH.....	46
IV.2.4	Influence de la teneur en charbon actif en poudre	47
IV.2.5	Influence de la concentration initiale de prédnisolone	48
IV.3	Conclusion.....	50
	Conclusion générale	51
	Références bibliographiques	52

Listes des figures

Chapitre I : Généralités sur les anti-inflammatoires

Figure I.1: Structure chimique de cortisone	5
Figure I.2: Effet anti-inflammatoire des stéroïdiens	7

Chapitre II : Données de base sur la technique d'adsorption

Figure II.1: Composant du phénomène d'adsorption.....	15
Figure II.2: Adsorption physique et chimique.....	16
Figure II.3: Etapes du mécanisme d'adsorption sur un matériau microporeux.....	18
Figure II.4: Classification des isothermes d'adsorption selon Giles et al.....	24
Figure II.5: Charbon actif en grains	28
Figure II.6: Charbon actif actif extrudé	29
Figure II.7: Charbon actif en poudre	29
Figure II.8: Fonctionnalités de surface d'un carbone activé	31
Figure II.9: structure des pores du charbon actif	32

Chapitre III : Méthodologie expérimentale

Figure III.1: Spectrophotomètre	38
Figure III.2: pH-mètre	38
Figure III.3: Balance de précision	38
Figure III.4: Dispositif filtration sous vide	38
Figure III.5: Agitateur magnétique	38
Figure III.6: Verrerie	38
Figure III.7: Papier Filtre	39
Figure III.8: Tare de pesée	39
Figure III.9: Pilon	39
Figure III.10: Pissette	39
Figure III.11: Bavette	39
Figure III.12: Gants	39
Figure III.13: Prédnisolone utilisé.	40
Figure III.14: La solution mère de Prédnisolone	40

Listes des figures

Figure III.15: Courbe d'étalonnage de Prédnisolone.....	41
Figure III.16: Les essais d'adsorption du Prédnisolone sur CAP	42

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV.1: Cinétique d'adsorption de prédnisolone sur charbon actif en poudre en eau distillée.....	44
Figure IV.2: Rendements d'élimination du prédnisolone en fonction de la vitesse d'agitation en eau distillée	46
Figure IV.3: Rendements d'élimination de prédnisolone en fonction du pH du milieu.....	47
Figure IV.4: Variation du rendement et de capacité d'adsorption en fonction de la teneur en CAP en eau distillée.....	48
Figure IV.5: Effet de la teneur initiale en prédnisolone sur l'adsorption sur charbon actif en poudre en eau distillée.....	49

Listes des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les anti-inflammatoires

Tableau I.1: Principaux AINS commercialisés en France (formes orales destinées à l'adulte)	4
Tableau I.2: Caractéristiques pharmacologiques des principaux corticoïdes destinés à la voie orale	6
Tableau I.3: Médicaments présents dans les eaux de surface africaines	9
Tableau I.4: Contamination des eaux profondes françaises et européennes pour les composés pharmaceutiques	10
Tableau I.5: Concentrations maximales en Carbamazépine et diclofénac dans les eaux potables	10
Tableau I.6: Teneurs en produits pharmaceutiques (ng/l) à l'entrée et à la sortie des STEP de quelques pays	11
Tableau I.7: Concentrations en résidus pharmaceutiques (en µg/L) dans les influents et effluents de STEP et rendements d'élimination	12
Tableau I.8: Produits pharmaceutiques en milieu aquatique Algériens	12
Tableau I.9: Propriétés physico-chimiques du prédnisolone	14

Chapitre II : Données de base sur la technique d'adsorption

Tableau II.1: Différences principales entre l'adsorption physique et chimique	17
Tableau II.2: Principales caractéristiques du charbon actif	32

Chapitre III : Méthodologie expérimentale

Tableau III.2: Conditions opératoires adoptées	42
---	----

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.1: Paramètres des modèles de la cinétique d'adsorption	45
Tableau IV.2: les paramètres des isothermes d'adsorption	50

Introduction générale

Introduction Générale

La protection de l'environnement est la responsabilité de chaque personne vivant sur cette planète. Elle débute par de simples actions quotidiennes pour devenir une réglementation nationale ou internationale à respecter. Le développement industriel et l'amélioration du mode de vie ont engendrés un nombre illimité des polluants d'eau dont un traitement approprié doit répondre aux critères techniques, économiques et écologiques. Parmi les polluants des eaux les plus inquiétants, les résidus des médicaments à usage humain ou vétérinaire attirent une particulière attention depuis les deux dernières décennies. L'occurrence des produits pharmaceutiques dans les diverses matrices aquatiques a été prouvée par de nombreuses recherches en signalant la toxicité de ces substances sur la faune et la flore aquatiques. La première étude qui a mis en évidence la présence de médicaments dans l'eau remonte au 1976 aux Etats-Unis à la station d'épuration municipale des eaux usées de "Big Blue Rivers"(Kansas City Missouri USA). L'étude relevait l'existence d'acide salicylique (28,79 g/L, soit 8,64 kg/jour) et d'acide clofibrique (7,09 g/L, soit 2,13 kg/jour) **(Hignite et Azarnoff, 1977)**.

Les résidus des médicaments ont été pratiquement trouvés dans tous les compartiments aqueux, dans les eaux usées, les eaux de surface, les eaux souterraines, même dans les eaux embouteillées **(Stackelberg et al., 2007; Kleywegt et al., 2011)** dont la source principale est les stations d'épuration. **(Miège et al., 2009; Soulier et al., 2011)**. Les effets négatifs des substances médicamenteuses ont été l'objet de nombreuses recherches qui ont confirmé l'écotoxicité de certains notamment pour la faune aquatique. Un traitement convenable à ce type de composés est donc indispensable afin de réduire leur impact sur l'écosystème et préserver la santé publique.

Diverses techniques (coagulation-floculation, précipitation chimique, oxydation avancée, systèmes membranaires) ont été employées pour traiter les produits pharmaceutiques. Cependant, l'adsorption sur charbons actifs demeure le procédé le plus efficace, le plus économique, et le plus écologique. **(Balarak et al., 2016; Putra et al., 2009; Adriano et al., 2005; Moussavi et al., 2013)**. Les matériaux adsorbants utilisés dans l'adsorption peuvent être commercialisés ou préparés in situ. Les nouvelles approches écologiques sont orientées vers la valorisation des déchets agricoles ou végétaux pour la préparation des charbons actifs afin de répondre aux exigences économiques et environnementales. Divers déchets ont été valorisés à savoir les noyaux de dattes, d'olive, d'abricots, de nèfles, les déchets des bananes, de pomme de terre, de tomate,....etc, et ont donné des rendements très satisfaisants **(Tseng et al., 2003 ; yahia, 2006 ; Ndi et Ketcha., 2013 ; Dina et al., 2012 ; Limoussy et al., 2016 ; Mansouriet al., 2015)**

Introduction Générale

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail consiste à l'étude des performances du charbon actif pour l'élimination d'un anti-inflammatoire stéroïdien (prédnisolone) en solution synthétique. Le choix du médicament est fondé sur la consommation excessive de cet anti-inflammatoire pendant la deuxième vague de la pandémie Covid-19 en Algérie.

Le manuscrit est subdivisé en deux parties. La première partie comprend deux chapitres, le premier comportera des généralités sur les anti-inflammatoires à savoir leurs types, présence, et nuisances. Alors que le deuxième chapitre est destiné à la théorie d'adsorption, sa modélisation, les paramètres influençant ce processus, ainsi que quelques travaux sur l'adsorption des résidus médicamenteux. En revanche, la deuxième partie de ce mémoire est consacrée à l'étude expérimentale dont le premier chapitre concerne la méthodologie expérimentale suivie. Par contre, le dernier chapitre englobe l'analyse des résultats acquis en plus des discussions et des interprétations relatives.

CHAPITRE I

Généralités sur les anti-inflammatoires

I.1 Introduction

Le développement industriel accentué et l'amélioration du mode de vie ont engendrés un nombre illimité des polluants d'eau dont un traitement approprié dépend de la nature du polluant, sa concentration, ainsi que sa forme dans le milieu aqueux. Parmi les polluants des eaux les plus inquiétants, les résidus des médicaments à usage humain ou vétérinaire attirent une attention particulière depuis les deux dernières décennies. L'occurrence des produits pharmaceutiques dans les diverses matrices aqueuses a été prouvée par de nombreuses recherches en signalant une situation alarmante concernant la toxicité de ces substances sur la faune et la flore aquatiques. Les anti-inflammatoires sont parmi les médicaments les plus consommés au niveau mondial et les plus présents dans les milieux aqueux.

Le présent chapitre va discuter les types des anti-inflammatoires, leur provenance, leur présence, ainsi que leur toxicité.

I.2 Types des anti-inflammatoires et leur consommation

Les anti-inflammatoires se répartissent en deux grandes classes: les anti-inflammatoires non stéroïdiens (ou AINS) et les anti-inflammatoires stéroïdiens (ou corticoïdes).

I.2.1 Les anti-inflammatoires non stéroïdiens

Les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) constituent la classe thérapeutique la plus utilisée en raison de leur activité antipyrétique, antalgique et anti-inflammatoire. Ils sont utilisés dans de nombreuses indications comme dans les douleurs ostéomusculaires, les affections rhumatologiques, en traumatologie, dans les coliques néphrétiques. L'utilisation des anti-inflammatoires non stéroïdiens expose à de nombreux effets indésirables (effets indésirables) via leur toxicité cutanée, digestive, hépatique, rénale et radio vasculaire (Lapeyre et al., 2013).

I.2.1.1 Principaux effets indésirables

L'incidence d'un effet indésirable donné dépend de la nature de l'AINS et de sa posologie ainsi que du terrain du malade et des médicaments associés. Les facteurs physiopathologiques et pharmacologiques favorisant la survenue des accidents graves constituent les principales contre-indications et précautions d'emploi des AINS (Cofer, 2010).

Les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) peuvent entraîner :

- Une insuffisance rénale fonctionnelle surtout chez les patients ayant une hypovolémie efficace (insuffisance cardiaque, syndrome néphrotique, cirrhose)
- Une hyperkaliémie (par hypo-réninisme/ hypo-aldostéronisme)
- Une rétention hydro sodée se traduisant par des œdèmes des membres inférieurs, une augmentation de la pression artérielle ou la décompensation d'une cardiopathie congestive (Morère et Rainfray., 2007).

Le classement des AINS selon leur famille chimique est illustré dans le tableau I.1.

http://www.bichat-larib.com/publications.documents/5249_These_signee_compressee.pdf

Tableau I.1: Principaux AINS commercialisés en France (formes orales destinées à l'adulte)

http://campus.cerimes.fr/rhumatologie/enseignement/rhumato25/site/html/2_21_1.html

Famille chimique	Dénomination commune internationale	Spécialités (exemples)	Posologie quotidienne Moyenne / Maximale
Salicylés	Acide acétylsalicylique Acétylsalicylate de lysine Carbasalate calcique	Aspirine Ursa Aspégic Solupsan	2-3 g / 6 g 2-3 g / 6 g 2-3 g / 6 g
Acide arylcarboxylique	Acide tiaprofénique* Fénoprofène Flurbiprofène Ibuprofène* Kétoprofène* Naproxène sodique* Nabumétone Étodolac Didofénac* Kétorolac Ibuprofène * Alminoprofène Acéclofénac	Surgam Nalgésic Cébutid Brufen Profénid Apranax Nabucoc Lodine Voltarène <i>Acular</i> <i>Advil</i> <i>Minalfène</i> <i>Cartrex</i>	300-400 mg / 600 mg 900 mg / 1 500 mg 100 mg / 300 mg 1,2 g / 2,4 g 150 mg / 300 mg 550 mg / 1 100 mg 1 g / 2 g 200 mg / 600 mg 75-100 mg / 150 mg collyre 1,2 g / 2,4 g 600 mg / 900 mg 200 mg / 200 mg
Acides anthraniliques ou fénamates	Acide néfénamique Acide niflumique	<i>Ponstyl</i> <i>Nifluril</i>	750-1 000 mg / 1 500 mg 750-1 000 mg / 1 500 mg
Coxibs	Célécoxib Parécoxib	<i>Celebrex</i> <i>Dynastat</i>	200 mg / 400 mg Voie parentérale
Oxicams	Méloxicam Piroxicam* Tenoxicam	<i>Mobic</i> Feldène Tilcotil	7,5 mg / 15 mg 10-20 mg / 30-40 mg 10 mg / 20 mg
Indoliques	Indométacine* Sulindac	<i>Indocid</i> <i>Arthrocline</i>	50-100 mg / 150-200 mg 200 mg / 400 mg
Pyrazolés	Phénylbutazone	<i>Butazolidine</i>	100-300 mg / 600 mg
Autre AINS	Nimésulide	<i>Néxen</i>	200 mg / 200 mg

* Médicament disponible sous la forme de générique.

I.2.1.2 Mécanisme d'action des AINS

Le mécanisme d'action des AINS le plus communément admis est l'inhibition des cyclo-oxygénases (COX) d'où résulte le blocage de la synthèse des prostaglandines et des thromboxanes A₂ à partir de l'acide arachidonique.

<https://sante.lefigaro.fr/sante/traitement/anti-inflammatoires-non-steroidiens/mecanisme-daction>

I.2.2 Les anti-inflammatoires stéroïdiens (corticoïdes)

Les anti-inflammatoires stéroïdiens sont des corticoïdes (figure I.1), dérivés du cortisol et de la cortisone, et ont un effet plus puissant. Parmi les anti-inflammatoires stéroïdiens, on trouve le prédnisone, prédnisolone, méthylprednisolone, ou encore, avec un effet plus prolongé, le bêtaméthasone ou le dexaméthasone.

<https://sante.journaldesfemmes.fr/fiches-medicaments/2542984-la-liste-des-anti-inflammatoires-steroidiens/>

Ils agissent en modulant l'expression génique d'un certain nombre de protéines impliquées dans la réaction inflammatoire. Cette action passe par la fixation à un récepteur nucléaire ubiquitaire appartenant à la superfamille des récepteurs aux stéroïdes (récepteur en doigt de zinc).

<https://pharmacomedicale.org/medicaments/par-specialites/item/corticoïdes-les-points-essentiels.>



Figure I.1 : structure chimique de cortisone

(Lettreuch, 2020)

C'est depuis 1948 que les propriétés anti-inflammatoires des corticoïdes sont utilisées en thérapeutique. Depuis, la corticothérapie générale a constitué une révolution dans la prise en charge de nombreuses maladies (Lettreuch, 2020).

I.2.2.1 Classification deux groupes de corticoïdes

- ✓ Les glucocorticoïdes naturels
- ✓ Les glucocorticoïdes de synthèse : ce sont ces derniers qui intéressent tout particulièrement l'odontostomatologie (Lettreuch, 2020).

I.2.2.2 Prescription et surveillance des anti-inflammatoires stéroïdiens

Les anti-inflammatoires stéroïdiens ou (gluco) corticoïdes sont des dérivés synthétiques des hormones naturelles, cortisol et cortisone, dont ils se distinguent par un pouvoir anti-inflammatoire plus marqué et, à l'inverse, un moindre effet minéral corticoïde.

Tableau I.2 : Caractéristiques pharmacologiques des principaux corticoïdes destinés à la voie orale.

<http://campus.cerimes.fr/rhumatologie/enseignement/rhumato25/site/html/cours.pdf>

Nature	Spécialités	Effet anti-inflammatoire	Effet minéralo-corticoïde	Demi-vie biologique
Cortisol*	<i>Hydrocortisone</i>	1	1	8-12 heures
Prednisone	<i>Cortancyl</i>	4	0,8	18-36 heures
Prednisolone	<i>Solupred</i>	4	0,8	18-36 heures
Méthyprednisolone	<i>Médrol</i>	5	0,5	18-36 heures
Triamcinolone	<i>Kénacort Retard</i>	5	0	36-54 heures
Bétaméthasone	<i>Betnesol</i>	25-30	0	36-54 heures
Dexaméthasone	<i>Dectancyl</i>	25-30	0	36-54 heures

* Hormone naturelle.

I.2.2.3 Mécanismes d'action anti-inflammatoire des corticoïdes

Les corticoïdes du fait de leur solubilité franchissent facilement les membranes cellulaires pour se fixer sur un récepteur spécifique, le complexe corticoïde-récepteur ainsi formé permet la synthèse des protéines (la lipocortine) à l'origine de l'action anti-inflammatoire. Les lipocortines inhibent la formation de l'acide arachidonique bloquant ainsi les réactions intracellulaires donnant naissance aux prostaglandines et aux leucotriènes. Inhibition de la phospholipase A2 en provoquant l'induction de la synthèse de lipocortines, les corticoïdes inhibent de ce fait des médiateurs de l'inflammation (Dangoumau, 2006).

I.2.2.4 Effet anti-inflammatoire des stéroïdiens (figure I.2)

D'une manière générale, les corticoïdes diminuent les inflammations aiguës et chroniques. Si elles limitent favorablement les conséquences néfastes des inflammations aiguës, elles freinent l'évolution des lésions résultant des inflammations chroniques et en soulagent les symptômes, mais elles ont un effet défavorable sur les aspects protecteurs de ces phénomènes et sur la cicatrisation (Dangoumau, 2006).

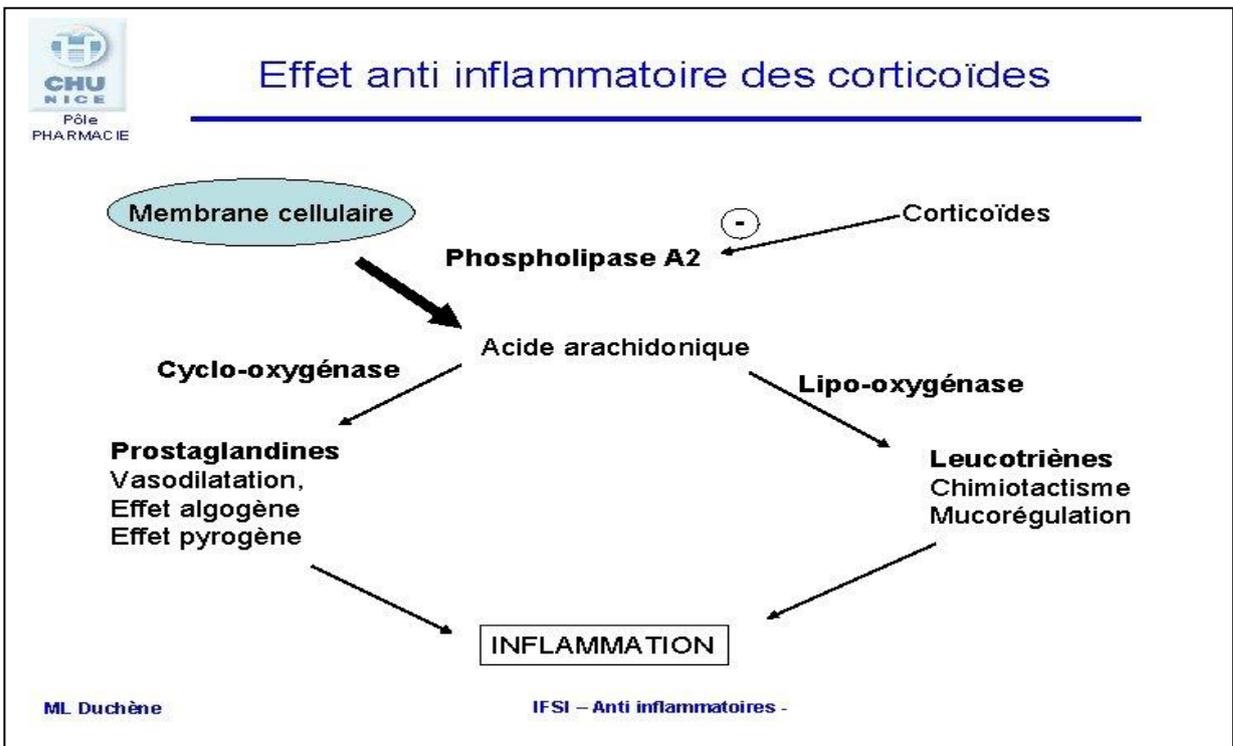


Figure I.2 : Effet anti-inflammatoire des stéroïdiens.

<https://slidetodoc.com/ifsi-sainte-marie-ple-pharmacie-les-anti-inflammatoires/>

I.3 Provenance des produits pharmaceutiques

Les effluents urbains sont une des principales sources de déversement des résidus des médicaments dans les milieux aquatiques récepteurs en raison de leur incomplète dégradation dans les stations d'épuration (STEP) conventionnelles, lorsqu'elles existent. La conception de ces stations n'a pas été destinée pour traiter spécifiquement des micropolluants organiques à l'état de traces comme le sont notamment les substances médicamenteuses. Les taux d'élimination au sein des STEP sont très variables selon les molécules. Certaines comme l'aténolol, la carbamazépine, le métoprolol, le triméthoprime présentent des taux d'abattement inférieurs à 30 %, alors que d'autres comme la norfloxacine, le 17 β œstradiol et l'estriol présentent des taux d'élimination supérieurs à 80 % en raison de leurs propriétés physicochimiques et de leur biodégradabilité (Miège et al., 2009; Soulier et al., 2011).

I.4 Présence des anti-inflammatoires dans les eaux

Grâce aux progrès de l'analyse physico-chimique, la présence de traces de substances médicamenteuses et de leurs dérivés ou métabolites a été largement établie à l'échelle mondiale dans les différentes eaux, dans les boues des stations d'épuration utilisées en épandage agricole et dans les sols. Les résidus des médicaments sont présents pratiquement dans tous les compartiments aqueux en concentration très faibles (de l'ordre de $\mu\text{g/l}$ à ng/l). Malgré leur faible teneur, leur impact est assez inquiétant.

<http://politiquedesante.fr/author/olivier-toma/>

a. Eau de surface

Dans les eaux de surface, les teneurs en produits pharmaceutiques sont inférieures par rapport aux eaux usées en raison de la dilution en aval des rejets de STEP. Plus d'une centaine de molécules de diverses classes pharmaceutiques, des analgésiques et anti-inflammatoires, des antibiotiques, des antiépileptiques, des bêtabloquants, des hypocholestérolémiants, des agents de contraste, des hormones, des antidépresseurs et anxiolytiques, ont été trouvés dans les eaux de surface dans plusieurs régions du monde : Europe, Amérique, et plus récemment Asie et Afrique. Parmi les anti-inflammatoires détectés, on cite la carbamazépine, le diclofénac, le sulfaméthoxazole, l'ofloxacine, et l'ibuprofène (Andreozzi et al., 2003). Certains antibiotiques ont été détectés jusqu'à $1 \mu\text{g/L}$. Les mêmes auteurs indiquent que les concentrations maximales de sulfaméthoxazole et de roxithromycine dans la seine sont de l'ordre de 202 ng/L et de 36 ng/L respectivement (Bruchet et al., 2005). La contamination des eaux de surface est assez semblable à l'échelle européenne et les contaminants les plus fréquemment détectés sont à la fois les plus consommés (Paracétamol, Aspirine) et les plus résistants (Carbamazépine, Diclofénac) (Loos et al., 2009).

Pour les eaux de surface africaines, divers produits pharmaceutiques de plusieurs classes thérapeutiques ont été détectés, et à titre d'exemple le tableau I.3 regroupe les concentrations de (6) produits médicamenteux.

Tableau I.3: Médicaments présents dans les eaux de surface africaines.

<i>Classe thérapeutique</i>	<i>médicaments</i>	<i>Concentration (µg/l)</i>	<i>Pays</i>	<i>Référence</i>
Anti-inflammatoire non stéroïdien	Ibuprophène	0,026 – 0,091 3,04 – 5,08 4,8 – 11	Egypte Nigéria South Africa	(Abdallah et al, 2019) (Olaitan et al, 2017) (Madikizela et Chimuka, 2017a)
	Diclofénac	0,9 – 5,3 0,077 0,14	South Africa Egypte Nigéria	(Madikizela et Chimuka, 2017a) et (Abdallah et al, 2019) (Olaitan et al, 2017)
Antibiotiques	Amoxicilline	0,021 0,0027	Egypte Ghana	(Abdallah et al, 2019) (Azanu et al, 2018)
	Ampicilline	0,021 – 0,184	Ghana	(Azanu et al, 2018)

b. Eau souterraine

Elles sont généralement utilisées pour l'irrigation et la consommation humaine (eaux potables) (Siemens et al., 2008 ; Vazquez-Roig et al., 2012). La connaissance de sa salubrité est importante pour protéger la santé publique. L'existence des résidus médicamenteux dans les eaux souterraines est l'objet des recherches dans le monde.

Leurs concentrations sont trop faibles de l'ordre de quelques dizaines de ng/l. Selon le tableau I.4 présente les teneurs en résidus de produits pharmaceutiques les plus fréquemment détectés dans les eaux souterraines européennes. Contrairement, les eaux souterraines africaines exposent deux médicaments qui ont été détectés au Cameroun (Branchet et al., 2019).

Tableau I.4:Contamination des eaux profondes françaises et européennes pour les composés pharmaceutiques.

<i>Composé</i>	<i>Fréquence de détection (%)</i>	<i>Concentrations moyennes (ng.L⁻¹)</i>	<i>Pays</i>	<i>Références</i>
Carbamazépine	42,1	12	Europe	[1]
	70	10,4	France	[2]
	14,7	14,2		[3]
Sulfaméthoxazole	24,4	2	Europe	[1]
	66	3	France	[2]
	3,2	11,3		[3]
Kétoprofène	10,4	26	Europe	[1]
	16	2,8	France	[2]
	0,8	57		[3]
Diclofénac	4,9	0	Europe	[1]
	20	9,7	France	[2]
	0,2	19		[3]
[1] (Loos et al., 2010); [2] (Lopez et al., 2015) et [3] (Vulliet & Cren-Olivé, 2011)				

c. Eaux potables

La qualité de l'eau potable est essentielle et directement liée à la santé générale. Si les enjeux sont plus importants et leurs traitements appliqués sont plus nombreux et onéreux que pour les eaux de surface (Simazaki et al., 2015). Les résidus des médicaments ont été détectés dans les eaux potables en particulier celles produites à partir des eaux naturelles. Leur teneur est très faible entre des dizaines et centaines de ng/l tableau I.5.

Tableau I.5 : Concentrations maximales en Carbamazépine et diclofénac dans les eaux potables

Composé	Max C. (ng.L⁻¹)	Pays	Références
Carbamazépine	25	Japon	Simazaki et al. (2015)
	10	USA	Benotti et al. (2009)
	43,2	France	Togola & Budzinski (2008)
	140	USA	Stackelberg et al. (2007)
Diclofénac	2,5	France	Togola & Budzinski (2008)
	16	Japon	Simazaki et al. (2015)
	18	Espagne	Carmona et al. (2014)

d. Eaux usées

Dans les eaux usées, les concentrations des produits pharmaceutiques sont élevées. La source de leurs résidus peut être ponctuelle (les effluents de station d'épuration, les rejets liquides industrielles) ou diffuse à cause des eaux de ruissellement, le lessivage des sols ou l'infiltration de lixiviats. La fraction majeure des composés pharmaceutiques provient des effluents des stations d'épuration (Cargouët et al., 2004). Le tableau I.6 représente des teneurs en médicament dans les eaux usées à l'entrée et à la sortie des STEP de quelques pays.

Tableau I.6 : Teneurs en produits pharmaceutiques (ng/l) à l'entrée et à la sortie des STEP De quelques pays.

Médicament	A l'entrée de la step	A la sortie du step	Pays	Référence
Ibuprophène	4100-10,210 600-1660	110- 2170 3400	Canada Allemagne	-(Lee,et al , 2005) -(Weigel, et al, 2004) -(Ternes, et al, 1998)
Diclofénac	1490 1020	6- 431 507	Espagne Italie	-(Gracia et al, 2012) -(Rosal et al , 2010) -(Patrolecco et al,2013)
Ketoprophène	940 458	330 218	Suède Portugal	-(Bendz et al , 2005) -(Santos et al , 2013)

Le tableau I.7 présente une synthèse établie à partir des publications récentes sur les différentes molécules retrouvées selon les classes thérapeutiques, leur concentration moyenne calculée à partir de ces études en entrée et sortie de STEP ainsi que le rendement d'élimination ainsi estimé.

Tableau I.7: Concentrations en résidus pharmaceutiques (en µg/L) dans les influents et effluents de STEP et rendements d'élimination (Deblondeet al., 2011)

Composés pharmaceutiques	Molécules	Influent		Effluent		Rendement d'élimination (%)
		moyenne	n	moyenne	n	
Analgésiques et anti inflammatoires	4-aminoantipyrine	1.517	1	0.676	1	55,4
	Antipyrine	0.04	1	0.027	1	32,5
	Codeine	2.8605	2	1.93	2	32,5
	Diclofenac	1.039	6	0.679	11	34,6
	Ibuprofene	13.482	10	3.480	17	74,2
	Indomethacine	0.136	2	0.166	3	-22,1
	Ketoprofen	0.483	5	0.333	9	31,1
	Ketorolac	0.407	1	0.228	1	44,0
Naproxen	5.077	7	0.934	13	81,6	

I.5 Les produits pharmaceutiques dans les eaux Algériennes

Malheureusement, peu d'études ont été consacrées à la détection des résidus médicamenteux dans les eaux algériennes, malgré que l'Algérie est le plus large marché des médicaments au niveau africain. Les recherches de (Kermia et al.,2016), ont confirmé la présence du diclofénac, ibuprofène, naproxène, et du ketoprofène à l'entrée et à la sortie des step de Reghaia et Beni Messous, dans les eaux usées, les eaux de surface du valley d'El Harrach et dans les eaux de robinet de l'université de USTHB. Les résultats obtenus sont exposés dans le tableau I.8

Tableau I.8 : Produits pharmaceutiques en milieux aquatiques Algériens

(Kermia et al.,2016)

Composé (ng/l)				
Milieu aquatique	Ibuprophène	Naproxène	Ketoprophène	Diclofénac
A l'entrée de la Step	1608- 8613	1220 – 9585	Nd – 565	991 – 2319
A la sortie de la Step	341 – 431	Nd – 334	Nd – 1035	1616 – 2711
Eau de surface	373	334		85
Eau de robinet	312		273	

I.6 Toxicité des anti-inflammatoires

Divers travaux ont prouvé que même à faibles concentrations, les résidus des médicaments auraient des effets sur le fonctionnement des écosystèmes avec notamment des effets observés sur le comportement des organismes aquatiques. Il apparait que certaines molécules sont actives à des concentrations entre le microgramme et la dizaine de microgrammes par litre comme, par exemple, la carbamazépine sur des crustacés, des antibiotiques sur des cyanobactéries ou la fluoxétine sur des poissons. Alors que, les hormones sont actives à des concentrations bien plus faibles, proches du nanogramme par litre. Les données confirmant les impacts écotoxiques des résidus des médicaments sont maintenant très nombreuses et largement publiées (Desbiolles et al., 2018).

A titre d'exemple sur la toxicité des anti-inflammatoires, le diclofénac est tenu pour responsable de la mort de 10 millions de vautours en Asie durant les années 2000 (Kümmerer, 2008).

I.7 Caractéristiques du Prédnisolone

La Prédnisolone est un glucocorticoïde de synthèse, utilisé comme anti-inflammatoire, sous de nombreuses formes, sa forme orodispersible (commercialisée sous les noms Solupred et Ultracortenol), elle représente avec la prédnisone, un médicament très couramment utilisé.

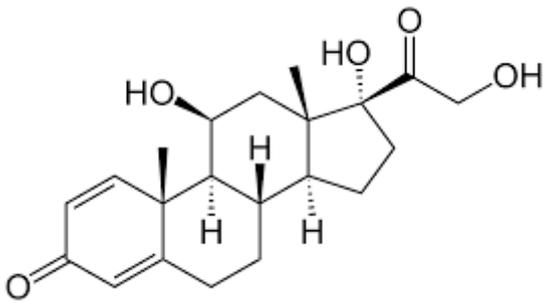
C'est un composé artificiel comme les stéroïdes naturels issus des glandes corticosurrénales (glandes situées au-dessus des reins, d'où le nom des corticostéroïdes), se construit à partir du noyau androstane. Ce noyau original le situe d'ailleurs dans la classe des stéroïdes.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Prednisolone>

Son effet anti-inflammatoire puissant conditionne son utilisation dans de nombreuses pathologies inflammatoires. Son utilisation est associée à une grande efficacité (Martijnet al., 2017), mais à de nombreux effets secondaires lors d'une utilisation à moyen et long terme, notamment sur le métabolisme hydrosodé (archive, sur base-donnees-publique.medicaments.gouv.fr., 2017). Les principales caractéristiques physico-chimiques du Prédnisolone sont regroupées dans le tableau I.9.

Tableau I.9: Les principales caractéristiques physico-chimiques du prédnisolone

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Prednisolone>

Classe thérapeutique	Anti-inflammatoires stéroïdiens
Nom chimique	PREDNICORT 20mg
Formule chimique	C ₂₁ H ₂₈ O ₅
Classe thérapeutique	Glucocorticoïde
Structure chimique	
Masse molaire	<u>360,44g/mol</u>
T° de fusion	235 °C
Log p	1,62
Synonyme	Prédnisolone
Solubilité	133 mg /l
Pka	12,59
Longueur d'onde	247 nm

Conclusion :

Durant ce chapitre, la problématique des produits pharmaceutiques dans les compartiments aqueux a été envisagée en présentant l'occurrence des résidus médicamenteux dans les divers types d'eaux (usées, de surface et potable). La toxicité de ces substances a été évoquée en signalant une inquiétude accrue. Alors que, la dernière partie du chapitre a été destinée au prédnisolone un anti-inflammatoire stéroïdiens qu'on va essayer de montrer son abattement via la technique d'adsorption.

CHAPITRE II
Données de base sur la technique
d'adsorption

II.1 Introduction

L'eau à traiter passe par divers procédés qui peuvent être classiques tels que la coagulation-floculation, décantation, filtration, désinfection, ou d'affinage à savoir l'adsorption ou l'osmose inverse. L'efficacité de chaque technique dépend de la nature des substances cibles, leurs concentrations, ainsi que leur forme. L'adsorption est un procédé simple et économique doté d'une grande capacité de décontamination des eaux polluées notamment les eaux industrielles.

II.2 Généralités sur l'adsorption

II.2.1 Définition de l'adsorption

L'adsorption est une technique de séparation liquide/solide. Son principe repose sur la propriété des solides à fixer sur leurs surfaces certains polluants (molécules ou ions) présent dans la phase aqueuse selon divers processus. Les adsorbants utilisés peuvent être des matières organiques, des carbonates, des argiles, des zéolites, ou des oxydes et hydroxydes de fer (figure II.1). Au cours ce processus, il y aura donc un transfert de matière de la phase aqueuse ou gazeuse vers la surface solide. Le solide acquiert alors des propriétés superficielles (hydrophobie ou hydrophile) susceptibles de modifier l'état d'équilibre du milieu (dispersion, floculation) (Desjardins, 1990; El Azzouzi, 1999; Arias et al., 2002).

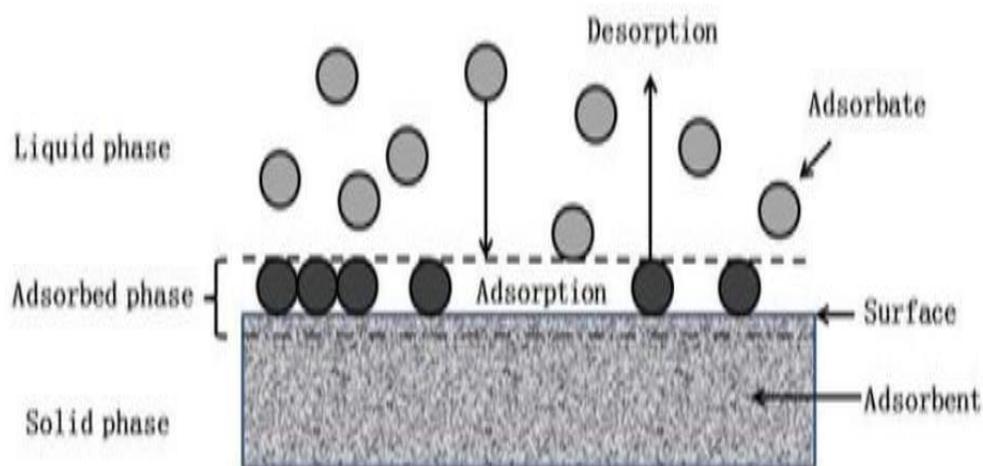


Figure II.1 : Composant du phénomène d'adsorption

<https://www.google.com/search?q=composants+du+phénomène+d'adsorption>

II.2.2 Types d'adsorption

Lors de la rétention d'une molécule à la surface d'un solide, la nature des liaisons formées et la quantité d'énergie échangée permettent de distinguer deux types d'adsorption tels que l'adsorption physique (physisorption) et adsorption chimique (chimisorption) (figure II-2).

- ✓ L'adsorption physique ou physisorption
- ✓ L'adsorption chimique ou chimisorption.

La (figures II.2) représentent la différence entre physisorption et chimisorption

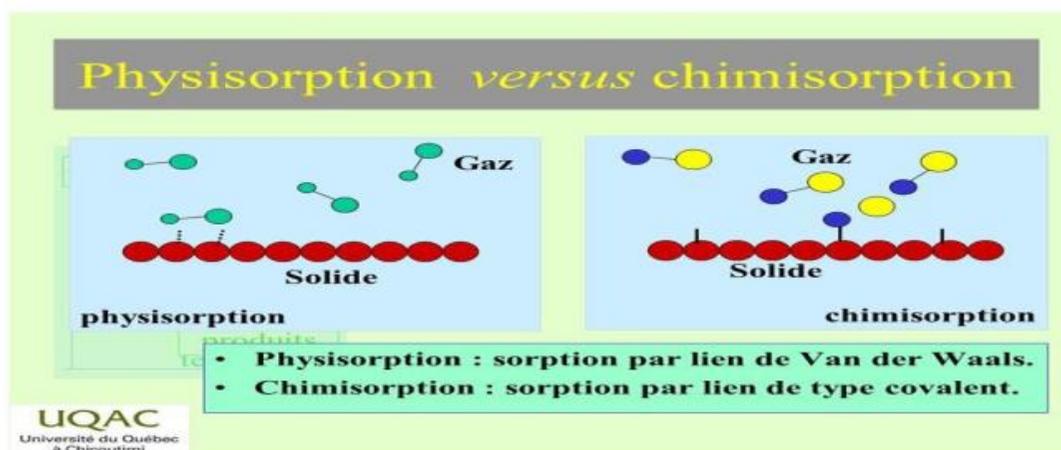


Figure II.2: Adsorption physique et chimique

<https://www.google.com/search?q=Adsorption+physique+et+chimique+&tbm>

- **Adsorption physique**

L'adsorption physique ou physisorption est un processus qui met en jeu de faibles interactions entre entités moléculaires comme les forces d'attraction de van der Waals et des forces dues aux interactions électrostatiques de polarisation. Elle est un phénomène réversible, peu spécifique, rapide et généralement limitée par les phénomènes de diffusion. L'énergie de l'adsorption physique est faible et comprise entre 5 et 40 kJ/mol. L'adsorption physique est donc favorisée par une baisse de la température et peut se faire en monocouche ou multicouches (Gherbi, 2008)

- **Adsorption chimique**

Appelée également chimisorption, elle met en jeu une énergie élevée (supérieure à 40 kJ mol⁻¹) et correspond aux liaisons covalentes plus permanentes entre l'adsorbant et la molécule adsorbée. Les mécanismes les plus fréquents dans ce cas sont la protonation et l'échange d'ions. Dans ce type d'adsorption, le temps de rétention est long et seule la première couche

liée à la surface adsorbant est chimiquement adsorbée, les autres couches, dans le cas où elles existent, sont retenues par physisorption. L'adsorption chimique est limitée à l'achèvement d'une couche moléculaire contrairement à l'adsorption physique. De plus, les particules ne seront pas adsorbées qualitativement et quantitativement de la même manière dans le cas d'un mélange (Talidi, 2006).

Tableau II.1 : Différences principales entre l'adsorption physique et chimique (Kharfalah, 2003).

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Type de liaison	Physique	Chimique
Chaleur d'adsorption (Kcal.mol ⁻¹)	1 à 10	10 à 25
Température du processus	Favorisée par un abaissement de température	Favorisée par accroissement de température
La vitesse d'adsorption	Rapide	Lente
Désorption	Facile	Difficile
Spécificité	Relativement non spécifique	Spécifique
La distance entre les molécules et la surface de solide	Grande	Petite
Ordre de grandeur de l'énergie d'activation	Rarement supérieur à quelques calories par mole	Supérieur à 20 Kcal.mol ⁻¹
Nature de la couche	Mono et multicouches	Mono couche seulement
La nature d'adsorption	La quantité d'adsorption élevée dépend davantage de l'adsorbant	Dépend de l'adsorbant et de l'adsorbat

II.3 Description des étapes d'adsorption

L'adsorption se produit principalement en quatre étapes. La (figure II.3) représente un matériau (adsorbant) avec les différents domaines dans lesquels peuvent se trouver les molécules organiques ou inorganiques qui sont susceptibles de rentrer en interaction avec le solide.

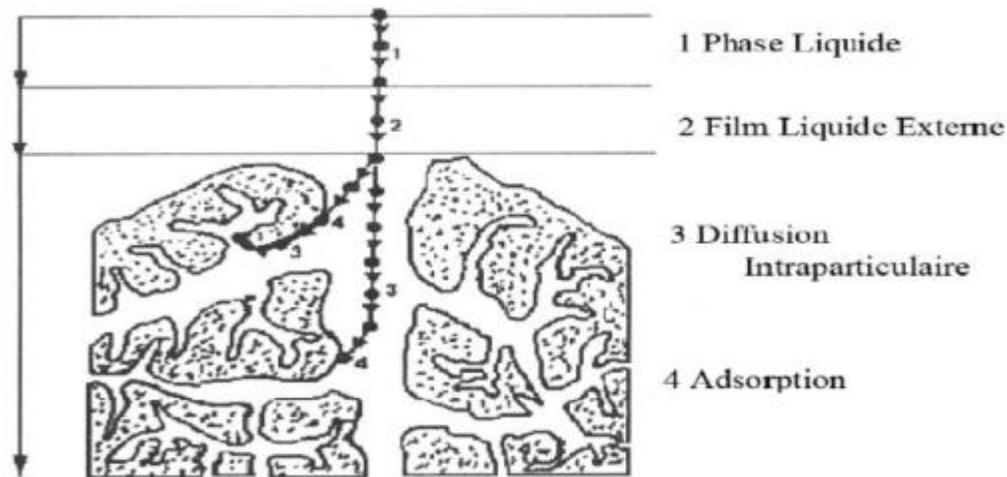


Figure II.3:Etapes du mécanisme d'adsorption sur un matériau microporeux (Sedira, 2013)

Les étapes d'adsorption peuvent être décomposées en : (Saoudi et al., 2013):

- Diffusion de l'adsorbant de la phase liquide externe vers celle située au voisinage de la surface de l'adsorbant.
- Diffusion extra granulaire de la matière (transfert du soluté à travers le film liquide vers la surface des grains).
- Transfert intra granulaire de la matière (transfert de la matière dans la structure poreuse de la surface extérieure des grains vers les sites actifs).
- Réaction d'adsorption au contact des sites actifs, une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile.

II.3.1 Facteurs influençant l'adsorption

Pour autoriser l'adsorption, Il faut rompre le lien entre les solutés et l'eau ; le solvant est mieux adsorbé lorsqu'une substance est soluble. La facilité avec laquelle l'adsorbant fixe l'adsorbant, est en fonction de la taille de la molécule et de sa solubilité dans l'eau. L'adsorption des composés ionisés est faible par conséquent un haut poids moléculaire réduit la diffusion de l'étape 3, la fixation. Il devient évident que les substances de caractère hydrophobe, peu affines avec l'eau, sont quantitativement adsorbées (Zeggai et Kherchouche, 2018).

L'équilibre d'adsorption entre un adsorbant et un adsorbant dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont décrits ci-après :

II.3.1.1 Surface spécifique

Elle est la surface par unité de masse (exprimée en m^2/g), définie la quantité de substance adsorbée, augmente avec l'accroissement de la surface absorbante pour atteindre un effet d'adsorption important. Il est nécessaire que la surface de l'adsorbant soit le plus grand possible (Mekraoui, 2001).

II.3.1.2 Le pH

L'adsorption est maximum au point isoélectrique puisque les liaisons avec l'eau y sont minimums, de même une molécule neutre est mieux adsorbée qu'une autre.

(Zeggai et Kherchouche, 2018).

II.3.1.3 La température

L'adsorption physique est généralement exothermique, d'où les résultats sont meilleurs à froid. La chimisorption par contre est endothermique. On cite par exemple une application curieuse et intéressante de l'action de la température dans l'épuration des eaux de teinturerie, pour obtenir une adsorption sélective des colorants en présence de détergents (Arris, 2008).

II.3.1.4 La masse de l'adsorbant

L'adsorption est d'autant plus grande que la masse de l'adsorbant dans la solution est importante. Le choix d'un rapport liquide-solide optimal est recommandé en concurrence du coût élevé des adsorbants (Couderc, 2002).

On distingue d'autres facteurs liés à:

a. La nature de l'adsorbant

- La densité et la nature du groupe fonctionnel qui se trouve à sa surface.
- La distribution et la taille des pores (Talidi, 2006).

b. La nature de l'adsorbat

- Sa masse moléculaire.
- Sa polarité.
- Sa solubilité.
- La taille des molécules.
- La nature des groupements fonctionnels (acides ou basiques)

(Salam et Bandoz, 2005).

c. Les conditions opératoires

- La concentration en adsorbant et en adsorbat.
- Le temps de contact entre l'adsorbant et l'adsorbat.
- La vitesse d'agitation (Sekirifa et Hadj-Mahammed, 2005).

Les adsorbants industriels les plus utilisés sont :

- Les zéolithes.
- les gels de silice
- Les alumines activées
- Les argiles activées.
- Le plus utilisé est le charbon actif (Sedira, 2013).

II.3.2 La cinétique d'adsorption

La connaissance de la cinétique d'adsorption dans des opérations fondées sur les phénomènes d'adsorption présente un intérêt pratique considérable pour la mise en œuvre optimale d'un adsorbat ainsi que pour les facteurs qu'il faut optimiser pour fabriquer ou améliorer un adsorbat, conduisant à la cinétique la plus rapide possible (Cassan et al., 1976).

II.3.2.1 Modélisation de la cinétique d'adsorption

L'exploitation des différents transferts de masse a entraîné le développement d'un grand nombre de modèle afin de décrire les étapes de la cinétique. Généralement, la cinétique d'adsorption est souvent étudiée en utilisant les modèles suivants (Boudermine et Rouibah, 2020):

✚ Modèle cinétique du pseudo-first-order (PFO)

Appelé aussi modèle de Lagergren il est supposé dans ce modèle que la vitesse d'un système d'adsorption solide-liquide à l' instant t est proportionnelle à la différence entre la quantité adsorbée à l'équilibre q_e et la quantité adsorbée à cet instant q_t et que l'adsorption est réversible. La forme non linéaire du modèle pseudo-premier-ordre est représentée comme suit (Lagergren, 1898) :

$$q_t = q_e (1 - e^{-K_1 t}) \quad (\text{II} - 1)$$

Avec :

k_1 : la constante de vitesse du PFO (min^{-1})

q_e et q_t : présentent la quantité du soluté adsorbée par unité de masse à l'équilibre et celle adsorbée à l'instant t, en (mg/g).

La quantité du soluté adsorbé par unité de masse de l'adsorbant (q) encore appelée : la capacité d'adsorption est calculée à partir de l'équation suivante

$$q = (C_0 - C_e) v/m \quad (\text{II} - 2)$$

Avec :

C_0 : La concentration initiale (mg/l)

C_e : concentration à l'équilibre en métal dans la solution (mg/l)

v : le volume de la solution (l).

m : la masse de l'adsorbant (g).

✚ Modèle de pseudo-second-ordre (PSO)

La forme non linéaire du modèle pseudo-deuxième-ordre (PSO) de la cinétique d'adsorption est représenté par la relation de (Blanchard et al., 1984) :

$$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t} \quad (\text{II} - 3)$$

Avec :

k_2 : la constante de vitesse de PS2 (g/mg.min).

L'équation du pseudo-second ordre est souvent utilisée avec succès pour décrire la cinétique de la réaction de fixation des polluants sur l'adsorbant. Le modèle du pseudo-second ordre décrit par l'équation (II-5) permet de caractériser la cinétique d'adsorption en prenant en compte à la fois le cas d'une fixation rapide des solutés sur les sites les plus réactifs et celui d'une fixation lente sur les sites d'énergie faible.

✚ Modèle de diffusion externe

L'expression cinétique suivante est très souvent utilisée et citée pour modéliser la diffusion externe pour tout transfert de soluté d'une phase liquide vers une autre phase (Rouibah, 2013):

$$- dC_t / dt = k_1 \cdot (v) \cdot (C_t - C_e) \quad (\text{II} - 4)$$

Avec :

C_t : la concentration en solution à l'instant t (g/m³).

C_e : la concentration à l'équilibre du soluté en solution (g/m³).

A : L'aire de l'interface solide/liquide (m^2).

v : Le volume de la solution (m^3).

k_1 : Le coefficient de transfert externe (m/min).

La forme intégrée de l'équation (II-7) est

$$\ln (C_t / (C_t - C_e)) = k_1 (A/v) t = kt \quad (\text{II-5})$$

Où :

$$\ln (C_t / C_e) = -k_1 (A/v) t = -kt \quad (\text{II-6})$$

✚ Modèle d'Elovich

Le modèle d'Elovich a été proposé en 1934 par Z. Elovich en étudiant l'adsorption du monoxyde de carbone sur dioxyde de manganèse, le modèle non linéaire d'Elovich est exprimée par la relation suivante (McLintock, 1967) :

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(t) (1 + \alpha\beta t) \quad (\text{II-7})$$

Avec :

α et β : les constantes d'Elovich.

α : le taux d'adsorption initiale ($mg/g.min$) liée à la vitesse de la chimisorption.

β : la constante (g/mg) liée à la surface externe (constante de désorption).

✚ Modèle de diffusion dans le film liquide

Proposé par Boyd, ce modèle d'échange d'ions suppose avoir des particules sphériques et permet de distinguer entre la diffusion dans le film et la diffusion dans des pores, l'expression mathématique de ce modèle est donnée par (Rouibah, 2013):

$$(1 - F) = -k_f a t \quad (\text{II-8})$$

Avec :

F : la fraction partielle à l'équilibre $F = q_t/q_e$

k_f : la constante cinétique de Boyd (ml/min)

Le tracé de la courbe $(1 - F)$ vs t permet de prévoir si la cinétique est gouvernée par la diffusion dans le film liquide ou pas.

✚ Modèle de diffusion intra particulaire

Webber et Morris ont trouvé que la quantité adsorbée est proportionnelle à $t^{1/2}$ plutôt qu'avec le temps de contact t , le modèle est représenté par l'équation (Rouibah, 2013):

$$q_t = k_{id} \cdot t^{1/2} + C \quad (\text{II} - 9)$$

Avec :

k_{id} : la constante de vitesse de diffusion intra particulaire.

C (mmol/g) : l'épaisseur de la couche limite.

Cette constante est généralement en fonction de plusieurs paramètres et qui sont la concentration de la solution, la granulométrie de la particule, le pH et la température.

Dans la plupart des études, la courbe obtenue par ce modèle présente une multi linéarité généralement assimilée aux étapes successives de diffusion durant le processus d'adsorption.

II.4 Modélisation mathématique dans l'adsorption

II.4.1 Isothermes d'adsorption

Un isotherme est une courbe montrant la variation de la quantité d'une espèce liquide ou gazeuse adsorbée sur une surface solide en fonction de sa concentration en solution à l'équilibre. Les expériences d'adsorption sont effectuées à une température constante (Errais, 2011).

II.4.1.1 Classification des isothermes d'adsorption

Expérimentalement, on distingue quatre classes principales nommées : **S**(Sigmoide), **L**(Langmuir), **H** (Haute affinité) et **C** (partition Constante).

La Figure ci-dessous illustre la forme de chaque type d'isothermes

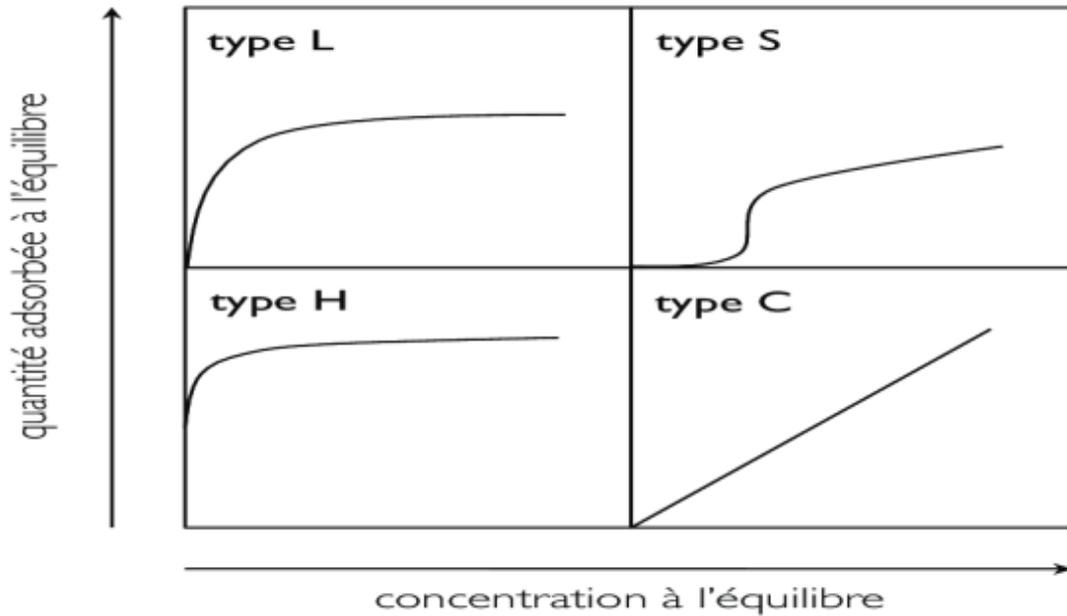


Figure II.4: Classification des isothermes d'adsorption selon Giles et al
(Dabrowskiet al., 2005).

a. Classe S

Les courbes de cette classe sont généralement obtenues lorsque les molécules du soluté (adsorbé) ne se fixent au solide que par l'intermédiaire d'un seul groupement. Dans ce type d'isotherme les molécules sont adsorbées verticalement, cet arrangement est favorisé lorsque le solvant rivalise avec le soluté pour l'occupation des sites d'adsorption (Couderc, 2002).

b. Classe L

Les courbes de type L dite de « Langmuir » sont les plus fréquentes. Elles sont caractérisées par une courbe concave par rapport à l'axe des concentrations. Ce type de courbes suggère que l'adsorption de la molécule de soluté se fait à plat sur la surface de l'adsorbant et la compétition entre les molécules de solvant et du soluté pour l'occupation des sites d'adsorption est faible (Mekraoui, 2001).

c. Classe H

La partie initiale de l'isotherme est presque verticale, la quantité adsorbée apparaît importante à concentration quasiment nulle du soluté dans la solution. Ce phénomène se produit lorsque les interactions entre les molécules adsorbées et la surface du solide sont très fortes (Yahiaoui, 2012).

d. Classe C

Cette classe est caractéristique de l'adsorption des molécules d'un soluté ayant une grande affinité pour un adsorbant. Elle est rencontrée lorsqu'il y a compétition entre le solvant et le soluté pour l'occupation des sites d'adsorption et lorsque l'adsorption concerne des molécules flexibles pénétrant dans les pores pour déplacer les molécules de solvant (Meziti, 2009).

II.4.1.2 Modélisation des isothermes d'adsorption

L'étude des équilibres d'adsorption a connue plusieurs modèles. On distingue les deux modèles à deux paramètres les plus réponsus sont ceux de Langmuir et Freundlich.

✚ Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir est l'un des modèles les plus utilisés, il repose sur les hypothèses suivantes (Langmuir, 1918)

- ✓ L'adsorption maximale correspond à un recouvrement monocouche de la surface de l'adsorbant.
- ✓ tous les sites de surface ont la même réactivité et sont identiques.
- ✓ la réactivité est instantanée et réversible.
- ✓ les molécules adsorbées ne présentent pas d'interactions entre elles.

La forme non linéaire de ce modèle est définit par l'expression suivante :

$$q_e = \frac{Q_{\max}^0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\text{II- 10})$$

Avec :

K_L : la constante d'équilibre de Langmuir (L/mg).

q_e : la capacité d'adsorption à l'instant t (mg/g).

✚ Modèle de Freundlich

En 1906, Freundlich a établi un isotherme très satisfaisant qui peut s'appliquer avec succès à l'adsorption des gaz, mais qui a été principalement utilisée pour l'adsorption en solution. Ce modèle empirique très utilisé montre la relation entre la concentration résiduelle d'un composé dans un liquide par rapport à la charge du composé sur l'adsorbant. Il est défini par la relation non linéaire suivante (Freundlich, 1906) :

$$q_e = k_f \cdot C_e^n \quad (\text{II} - 11)$$

Avec :

k_f : la constante d'équilibre de Freundlich (mg/g)/(mg/L)ⁿ

n : indique l'intensité d'adsorption.

$0.1 < n < 1$: il s'agit d'une bonne favorable adsorption.

$n > 1$: l'adsorption est faible.

✚ Modèle de Temkin

L'isotherme de Temkin tient compte du fait que la chaleur d'adsorption de l'ensemble des molécules de la couche de recouvrement diminue linéairement avec le taux de recouvrement en raison de la diminution des interactions adsorbant-adsorbat. L'adsorption est caractérisée par une distribution uniforme des énergies de liaison en surface. L'isotherme non linéaire de Temkin est exprimée sous la forme (Hadj Salah, 2013) :

$$q_e = (RT/b) \ln(k_T \cdot C_e) \quad (\text{II} - 12)$$

Avec :

RT/b_T est une constante liée à la chaleur d'adsorption.

k_T (l/g) : la constante qui correspond à l'énergie de liaison maximale.

R : la constante des gaz parfaits.

Les constantes b_T et k_{Tem} sont obtenues de la courbe représentant q_e vs $\log C_e$

✚ Isotherme de Brunauer, Emmett, Teller (BET)

Pour généraliser la théorie de Langmuir, Brunauer, Emmet, et Teller ont établi un modèle appelé modèle de BET (Brunauer, 1944). Il tient en compte de la formation de multicouche d'adsorbat, une distribution homogène des sites sur la surface de l'adsorbant l'existence d'une énergie d'adsorption qui retient la première couche de molécules adsorbées et une deuxième énergie qui retient les couche suivantes (Gherbi, 2008).

Ce modèle est exprimé par l'équation suivante :

$$C_e / ((C_s - C_e)) = (1/q_m \cdot k)(C_e/C_s) \quad (\text{II} - 13)$$

Avec,

q_e : capacité adsorbée à l'équilibre en (mg/g).

q_m : capacité de rétention mono moléculaire (mg/g).

C_e : concentration du soluté dans la phase liquide à l'équilibre (mg/l).

C_s : concentration soluté dans la phase liquide à la saturation de l'adsorbat mg/l.

✚ **Modèle de Dubinin – Radushkevich (D-R)**

Une autre équation utilisée dans l'analyse des isothermes a été proposée par Dubinin et Radushkevich en 1947. Elle suppose une surface hétérogène. Cette équation est utilisée pour estimer les caractéristiques de porosités apparentes et l'énergie libre d'adsorption (**Dubinin-Radushkevich, 1947**) :

$$q_e = q_{DR} e^{-K_{RD} \varepsilon^2} \quad (\text{II} - 14)$$

Avec :

q_{DR} : la capacité maximum théorique d'adsorbat adsorbé à la surface du solide (mg/g).

K_{DR} : est une constante liée à l'énergie d'adsorption ($\text{mole}^2 / \text{Kj}^2$) par la relation :

ε : Potentiel de Polanyi.

II.5 Les charbons activés

II.5.1 Introduction

La production des charbons actifs s'intensifie pendant la première guerre mondiale en raison de la prolifération des gaz toxiques et du développement des masques à gaz. Aujourd'hui, la production mondiale annuelle en charbons actifs atteint 420 000 tonnes (**Meljac, 2004**). Le charbon activé est l'adsorbant le plus utilisé dans le traitement des eaux polluées.

II.5.2 Définition charbon actif

Le charbon actif est un matériau solide noir carboné, sans goût, il se distingue du carbone élémentaire par l'élimination de toutes les impuretés non carbonées et l'oxydation de sa surface. Ils sont des adsorbants ayant un très grand nombre d'applications surtout dans le traitement des eaux notamment les eaux usées, ils sont utilisés pour purifier l'eau du goût et de l'odeur qui les affecte.

Ce matériau est obtenu à partir de différents ressources riches en carbone, comme le bois, la noix de coco, la houille, le lignite ou encore la tourbe. Sa chimie de surface et ses remarquables propriétés d'adsorption lui permet de trouver des applications dans différents domaines tel que la décoloration et la purification des liquides, la récupération des solvants, l'adsorption des polluants ou encore la séparation des gaz (**Guedidi, 2015**).

Le charbon actif présente une meilleure technologie par sa capacité d'adsorption car il élimine une variété considérable de contaminants organiques et inorganiques. A noter qu'une grande variété de matière première moins coûteuse est utilisée pour la fabrication du charbon actif (Sekirifa et Hadj-Mahammed, 2005).

Cette structure poreuse permet aux particules de charbon actif de développer une importante surface de contact avec le milieu extérieur (Nadia, 1998). La structure interne du carbone activé est constituée d'un assemblage plus ou moins aléatoire de feuillets élémentaires aromatiques. L'aspect aléatoire de la distribution de taille de pores peut rendre la sélectivité du matériau très faible.

II.5.3 Les différentes formes du charbon actif

Le charbon actif est principalement disponible sous trois formes différentes soit en grains, soit sous forme extrudée, soit en poudre.

a. Charbon actif en grain (CAG)

La forme du CAG est irrégulière et sa taille est comprise entre 0.2 – 5 mm (figure II .5), Il est majoritairement utilisé pour l'élimination des micros polluants organiques et de la matière organique des eaux, mais il est également appliqué au traitement des gaz. Les caractéristiques physiques du CAG varient considérablement selon les matériaux constitutifs et le mode de fabrication <https://www.lenntech.fr/francais/charbonactif-grain-poudre.htm>.



Figure II.5: Charbon actif en grains.

<https://www.google.com/search?q=Charbon+actif+en+grain>

b. Le charbon actif extrudé

Comme présentée dans la (figure II.6) est de forme cylindrique avec des diamètres allant de 0.8 mm à 5 mm. Il est principalement utilisé pour des applications en phase gazeuse à cause de sa faible perte de charge, de sa grande résistance mécanique et de sa faible teneur en poussières (Yahiaoui, 2012).



Figure II.6 : Charbon actif actif extrudé.

<https://www.donau-carbon.com/products-solutions/aktivkohle?lang=fr-FR>

c. Charbon actif en poudre (CAP)

Le charbon actif en poudre (figure II.7) prend la forme de grains de taille comprise entre 10 et 50 μm . Sous cette forme, il s'utilise souvent pour le traitement de l'eau et du gaz. Dans le premier cas, il est généralement utilisé en combinaison avec un traitement clarificateur pour augmenter le temps de contact entre le charbon et l'eau.

<https://www.lenntech.fr/francais/charbonactif-grain-poudre.htm>.

Dans notre étude nous utiliserons du charbon actif sous forme de poudre.



Figure II.7 : Charbon actif en poudre.

<https://www.google.com/search?q=Charbon+actif+en+poudre&lien>

c.1 Utilisation du charbon actif en poudre (CAP)

- Le charbon actif en poudre est utilisé en combinaison avec un traitement de clarification.
- Le charbon actif en poudre est ajouté continuellement avec l'eau à traiter avec des agents flocculant. Il est recommandé d'utiliser des clarificateurs pour augmenter le temps de contact entre le charbon et l'eau (Djidel, 2011).

II.5.4 Nature chimique de la surface d'un charbon activé

Les fonctions de surface sont introduites lors de l'étape d'activation et qui dépendent de la composition du précurseur et du mode d'activation. A la surface des charbons actifs, on trouve principalement des sites oxygénés et éventuellement des sites aminés. Si le charbon activé a subi un traitement chimique, d'autres groupes fonctionnels peuvent être introduits spécifiquement.

Les groupements oxygénés additionnels sont formés quand le charbon actif est traité avec des agents oxydants en phase gazeuse ou en solution. Ces traitements créent trois types de sites à la surface : acides, basiques et neutres.

Les sites de type acide sont des groupes carboxyliques (Ph-COOH), phénoliques (Ph-OH), carbonyliques (Ph-C=O), anhydrides (Ph-(C=O-O-O=C)), éther (Ph(-O-)Ph⁺), quinone (O=Ph=O) et lactoniques (PhC=OO-Ph⁺) (Figure II-8). Les sites acides rendent le charbon actif plus hydrophile, diminuent le pH en suspension aqueuse et augmentent la densité de charge négative à la surface (Guedidi, 2015).

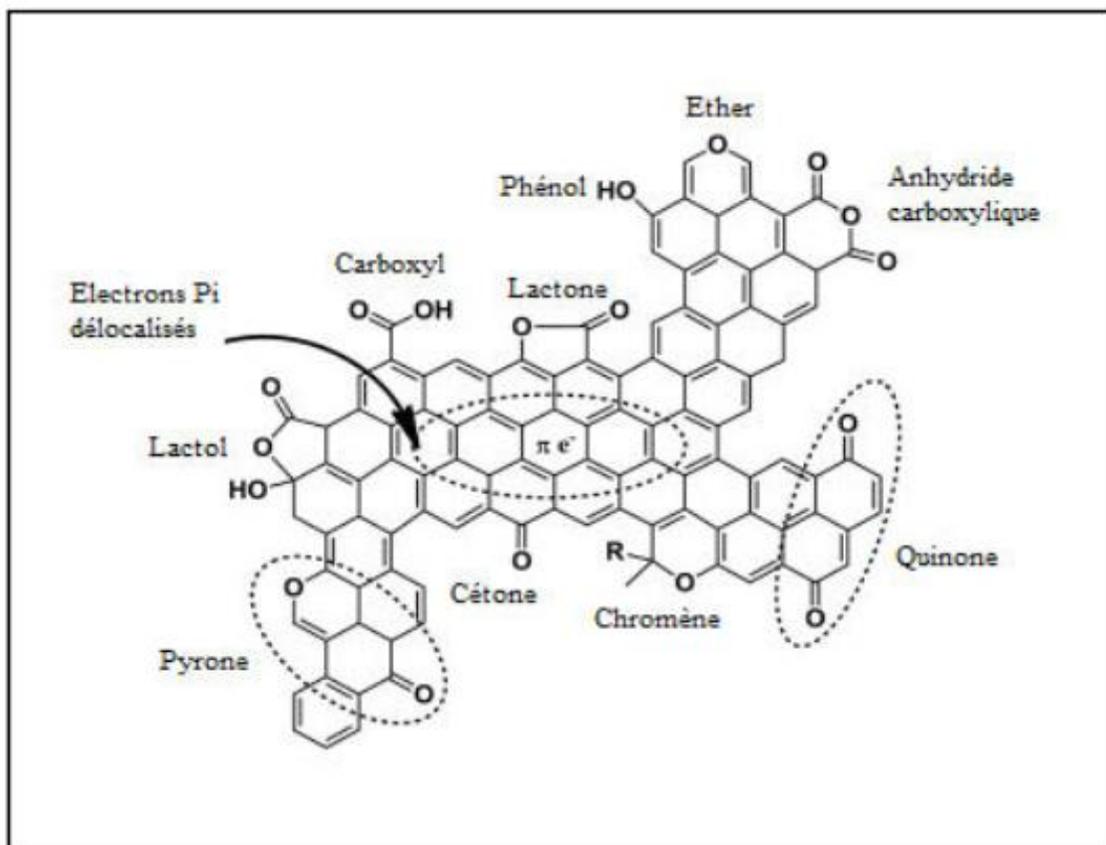


Figure II.8 : Fonctionnalités de surface d'un carbone activé (Guedidi, 2015).

II.5.5 Propriété texturales

- La structure du charbon actif est semblable à celle du graphite. En effet la structure cristalline de ce dernier consiste en un ensemble de couches planes d'atomes de carbone, ordonnés en hexagone réguliers, comparables aux cycles aromatiques.
- La texture du charbon actif se caractérise essentiellement par deux paramètres qui sont l'aire spécifique et la porosité (figure II.9). Ils sont essentiels pour la détermination des capacités et des cinétiques d'adsorption. Une classification simple permet de distinguer trois sortes de pores il s'agit des (Aga, 2015).

- Micropore < 2nm (1nm=10⁻⁹m)
- Mesopore 2 – 50 nm
- Macropore > 50nm

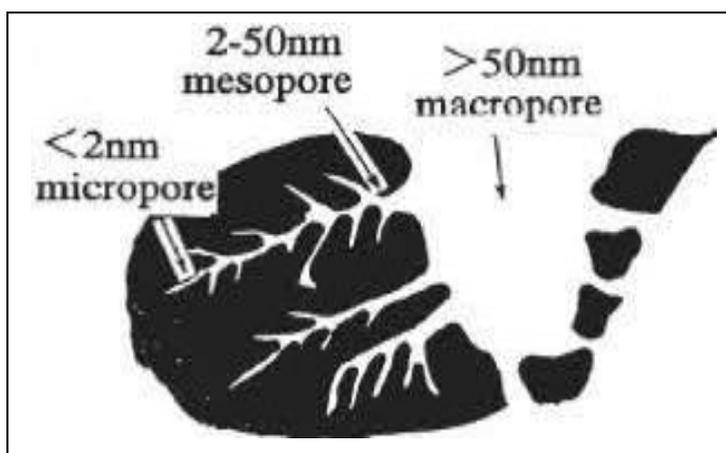


Figure II.9 : structure des pores du charbon actif.

https://www.memoireonline.com/11/13/7701/m_L-utilisation-industrielle-du-charbon-actif5.html

II.5.6 Propriétés de charbon actif

Plusieurs paramètres permettent de caractériser un charbon actif et sont regroupées dans le (tableau II.2).

Tableau II.2 : Principale caractéristiques du charbon active (Benfield et al., 1982).

Caractéristique	Description
Diamètre Effectif	Poudre : 8-9 μ m : granules : 0,55-1,05mm. Augmentation du taux d'adsorption et des pertes de charge lorsque la grosseur des grains diminue
Surface d'adsorption	De 850 à 1500 m ² /g. Plus cette surface est grande plus le charbon activé est efficace
Nombre de mélasse	Il est associé à la capacité du charbon active d'absorber les impuretés de masses moléculaires élevées
Densité brute	Evolution du volume de charbon active utilisé

II.5.7 Avantages et les inconvénients du charbon actif (CAP)

+ Les avantages du charbon actif (CAP)

- Le charbon actif en poudre est 2 à 3 fois moins cher que le charbon actif en granulés.
- Leur dosage en quantité réglable peut suivre la concentration des polluants si celle-ci est connue.
- Leur cinétique d'adsorption est rapide.

+ les inconvénients du charbon actif (CAP)

- ne peut pas être régénéré quand il est mélangé avec des boues d'hydroxyde.
- Il est difficile d'enlever les dernières traces d'impuretés sans ajouter une quantité très importante de charbon actif en poudre.
- La détection des pointes de pollution est problématique et sa concentration applicable est limitée.

<https://www.lenntech.fr/francais/charbonactif-grain-poudre.htm>

II.5.8 Principales applications

En général les charbons actifs sont utilisés dans plusieurs domaines (Bouziane, 2007) :

- Le traitement des eaux potables ou des eaux industrielles qui sont produites à partir des eaux de surface.
- Le traitement tertiaire des eaux résiduaires ou industrielles.
- Le traitement des eaux résiduaires industrielles.
- La purification industrielle des produits pharmaceutiques, chimiques ou alimentaires (Sucre, huiles végétales...).
- l'action catalytique en tant que support de catalyseur

II.5.9 Applications des charbons actifs dans le domaine de l'adsorption

Des expériences ont prouvé que le charbon actif est largement utilisé dans le domaine de l'adsorption. Ses différentes propriétés peuvent expliquer un large éventail d'applications, y compris le traitement de l'eau et de l'air. Il est utilisé comme sorbant dans les usines de préparation d'eau potable. De nombreuses études ont montré que le charbon actif est efficace pour éliminer différents types de polluants dans une eau à traiter, tels que le phénol (Stavropoulos et al., 2008), le naphthalène (Cabal et al., 2009), le parachlorophénol (Hao et al., 2009), l'ibuprofène (A.S. Mestre et al., 2007), les colorants tels que la tyrosine (Bouchemal et Achour, 2007) et le bleu de méthylène (Karagoz et al., 2008) et les composés inorganiques tels que les métaux lourds (Andreozzi et al., 2005).

Le charbon actif est un matériau qui intervient surtout au niveau tertiaire dans les chaînes de traitement des eaux et de raffinage ou pour extraire et récupérer les métaux lourds des eaux résiduaire industrielles, l'élimination par adsorption sur charbon actif est destinée à traiter des polluants à l'état de trace ou de faible concentration, sinon de fortes concentrations de polluants saturent rapidement la surface de l'adsorbant, ce qui nécessite des réactivations fréquentes qui peuvent être coûteuses. Par ailleurs, le charbon actif peut également jouer le rôle de catalyseur : sa grande surface spécifique et sa surface. La porosité fine fournit respectivement plusieurs sites actifs pour la réaction catalytique et grand volume de stockage (Deneuve, 2010).

Bien que l'adsorption se produise principalement au niveau des micropores, les pores moyens et les gros pores peuvent servir de canaux de transport pour réactifs et produits de réaction à travers la couche de catalyseur (Guedidi, 2015).

II.6 Elimination des produits pharmaceutiques par l'adsorption

a. Adsorption du paracétamol

L'utilisation d'un charbon actif commercial non-modifié en forme de bâtonnet pour l'adsorption du paracétamol en milieu aqueux. L'étude de la cinétique et des isothermes d'adsorption ont été réalisées en solution aqueuse avec un pH de milieu. L'isotherme d'adsorption a été étudiée en utilisant les modèles de Langmuir et Freundlich et la cinétique avec les modèles cinétique de diffusion intra-particulaire, diffusion de film ainsi que le modèle de Boyd. Les résultats ont montré que la cinétique d'adsorption obéit à une équation de PS2 et elle se déroule en deux étapes dont l'une est très lente et constitue l'étape limitant. Ce résultat a été confirmé par le modèle de Boyd. Le modèle de Freundlich est le plus adapté pour décrire les isothermes expérimentales (Aloui et Zertal, 2016).

b. Adsorption de l'ibuprofène

Dans cette étude les données de la cinétique d'adsorption ont été modélisées à l'aide des équations cinétiques du PS1 et du PS2, l'adsorption de trois composés pharmaceutiques (ibuprofène, naproxène et carbamazépine) sur de l'argile naturelle sur la base de paramètres d'équilibre tels que le temps de contact, le pH, la variation de la concentration et de la température.

Les résultats ont indiqué que l'adsorption est mieux décrite en utilisant le modèle du PS2. L'étude des isothermes a été effectuée en appliquant les modèles de Langmuir, Freundlich et Dubinin–Radushkevich. Les paramètres thermodynamiques obtenus ont montré que l'adsorption des produits pharmaceutiques sur l'argile est un processus spontané et endothermique (Khazriet et al., 2017).

c. Adsorption de l'amoxicilline

L'activation des nanoparticules de carbone a été étudiée par des solutions aqueuses de NaOH, KOH, ZnCl₂, NaCl et HNO₃. L'élimination des antibiotiques d'échantillons aqueux a été réalisée en utilisant une méthode modulaire. L'efficacité d'élimination (R %) des polluants a montré que le NaOH peut être utilisé comme un activateur efficace, peu coûteux et respectueux de l'environnement (R%=74–88).

Les paramètres optimisés de pH= 2, une quantité d'adsorbant de 0,4 g.L⁻¹, une concentration de solution antibiotique de 20 mgL⁻¹, un temps de contact de 8h et une température de 45°C ont été obtenus de manière modulaire.

Les études de la cinétique ont confirmé que l'adsorption suivait une cinétique de réaction de PS2. Les études thermodynamiques ont révélé que le processus était spontané et endothermique. La réutilisabilité du sorbant a été obtenue en utilisant une solution de NaOH (5 p/p%) et un temps de récupération de 4h.

(Pouretedal et al., 2014).

d. Adsorption du diclofénac sodique

Les résultats ont montré que le modèle de la cinétique de PS2 décrit mieux l'adsorption de diclofénac de sodium par les charbons actifs, Le charbon actif a été obtenu par activation des déchets de pelure de pomme de terre par K₂CO₃ sous des conditions optimisées et a été appliqué comme adsorbant en phase liquide du diclofénac de sodium en parallèle avec un charbon actif commercial. La surface spécifique de CA de laboratoire était de 866 m²g⁻¹.

De plus, les deux adsorbants présentent des isothermes d'adsorption qui étaient mieux adaptée par le modèle de Langmuir. Le charbon de laboratoire et le charbon commercial présentent des capacités de monocouche d'adsorption de 69 et 146 mg.g⁻¹, et les constantes de Langmuir de 0,38 et 1,02 L.mg⁻¹, respectivement (Bernardo et al., 2016).

e. Adsorption du métronidazole

Dans cette étude l'adsorption du métronidazole (MNZ) par la balle de riz a été effectuée en batch. L'élimination du MNZ augmentait avec l'augmentation de la température, L'influence du temps de contact de la concentration initiale, du dosage de l'adsorbant et de la température a été étudiée. Le temps d'équilibre s'est avéré être de 90 minutes à toutes les concentrations.

Les données expérimentales est bien adapté avec l'isotherme de Langmuir par rapport à l'isotherme de Freundlich, Temkin et Dubinin-Radushkevich, prouvant une adsorption mono couche et une surface homogène de l'adsorbant.

Les résultats ont indiqué que la balle de riz modifiée est un adsorbant technologique prometteur à faible coût pour l'élimination des antibiotiques (Azarpira et al., 2016).

f. Adsorption de la pénicilline G

L'adsorption des antibiotiques : les tétracyclines, les quinolones et les pénicillines par un charbon actif a examinée. Selon les données collectées, des capacités d'adsorption maximales de 1340.8, 638.6 et 570.4 mg.g⁻¹ ont été rapportées pour les tétracyclines, les quinolones et les pénicillines, respectivement.

La cinétique d'adsorption a suivi le modèle du PS2 et l'analyse utilisant le modèle de Weber-Morris a révélé que la diffusion intra-particule n'était pas la seule étape de contrôle de la vitesse. Les valeurs de n pour l'isotherme de Freundlich étaient inférieures à l'unité, ce qui suggère que l'adsorption était non linéaire favorable (Muthanna, 2017).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie de l'adsorption, ces mécanismes et leurs modèles et nous avons aussi évoqué les paramètres qui influent sur les performances d'adsorption. Une partie de ce chapitre a été destinée au charbon actif à savoir son objectif and le traitement des eaux, principe de production du charbon, ainsi que la structure chimique, poreuse ou morphologiques.

Chapitre III
Méthodologie expérimentale

III.1 Introduction

Les essais expérimentaux de l'élimination du prédnisolone par adsorption sur charbon actif en poudre en solution aqueuses a nécessité des appareillages du dosage, des instruments d'analyses, des réactifs chimiques, ainsi que des dispositifs avant, durant et après le traitement. L'optimisation de la rétention du produit pharmaceutique est effectuée via la variation des conditions opératoires telles que le temps du contact, le pH, la teneur en adsorbant, ainsi que la teneur en CAP.

La méthodologie expérimentale suivie pour la réalisation des essais expérimentaux de l'adsorption du prédnisolone sur charbon actif en poudre en solutions aqueuses sera détaillée durant ce chapitre.

III.2 Dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux utilisés pour la réalisation des essais de la rétention de la prédnisolone sur charbon actif en eau distillée sont :

- ✚ Un spectrophotomètre pour le dosage des teneurs résiduelles du Prédnisolone (figure III.1).
- ✚ Un pH mètre pour la mesure du pH (figure III.2).
- ✚ Une balance de précision (figure III.3).
- ✚ Pompe sous vide pour filtrer les solutions après chaque essai (figure III.4).
- ✚ Agitateurs magnétiques à vitesse réglable (figure III.5).
- ✚ Des béchers de 100 et de 50 ml, des fioles de 1000 et de 50 ml, des pipettes de 1, 5 et 10 ml, des aimants, (figure III.6).
- ✚ Papier Filtre (figure III.7).
- ✚ Tare de pesée (figure III.8).
- ✚ Pilon (figure III.9).
- ✚ Pissette (figure III.10).
- ✚ Bavette (figure III.11).
- ✚ Gants (figure III.12).



Figure III.1 : Spectrophotomètre



Figure III.2 : pH-mètre



Figure III.3 : Balance de précision



Figure III.4 : Dispositif filtration sous vide



Figure III.5 : Agitateur magnétique



Figure III.6 : Verrerie



Figure III.7 : Papier Filtre



Figure III.8 : Tare de pesée



Figure III.9 : Pilon



Figure III.10 : Pissette



Figure III.11 : Bavette



Figure III.12 : Gants

III.3 Produits chimiques et préparation des solutions

Cette étude vise à éliminer un anti-inflammatoire par adsorption sur le charbon actif en poudre (PAC) en milieu aqueux. L'anti-inflammatoire stéroïdien (prédnisolone) a été choisi comme polluant en raison de sa forte consommation au niveau national et local durant la pandémie Covid-19. La prédnisolone est commercialisée sous forme de comprimés de 20 mg (Figure III.13) dont les principales propriétés physiques et chimiques sont présentées dans le chapitre I tableau I.9 page 14.

On a aussi utilisé un charbon actif en poudre commercialisé de granulométrie de 0,8 mesh, de surface spécifique de $658 \text{ m}^2/\text{g}$ et un pH point zéro charge de 6,5 (Ounoki et al, 2020).



Figure III.13 : Prédnisolone utilisé.

La solution mère de prédnisolone a été préparée dans une solution synthétique d'eau distillée à une concentration de 80 mg/l en dissolvant 4 comprimés de 20 mg dans 1 l d'eau distillée (figure III.14). Une agitation magnétique est nécessaire pour permettre au produit pharmaceutique de se dissoudre. Des solutions filles ont été préparées à partir de la solution mère pour préparer des solutions étalons (0,5 à 30 mg/L) pour le traçage de la courbe d'étalonnage ainsi que pour les différents tests de notre étude :



Figure III.14 : La solution mère de Prédnisolone

III.4 Dosage du prédnisolone

Les teneurs résiduelles du composé pharmaceutique étudiée après les essais d'adsorption sont dosées par spectrophotométrie en mesurant l'absorbance en U.V grâce à un spectrophotomètre de type photolab7600 UV-VIS. Les concentrations du Prédnisolone sont déterminées à partir des courbes d'étalonnage (figure III-15) qui sont établies avant chaque série d'essais. La longueur d'onde d'absorbance de prédnisolone est de 247 nm.

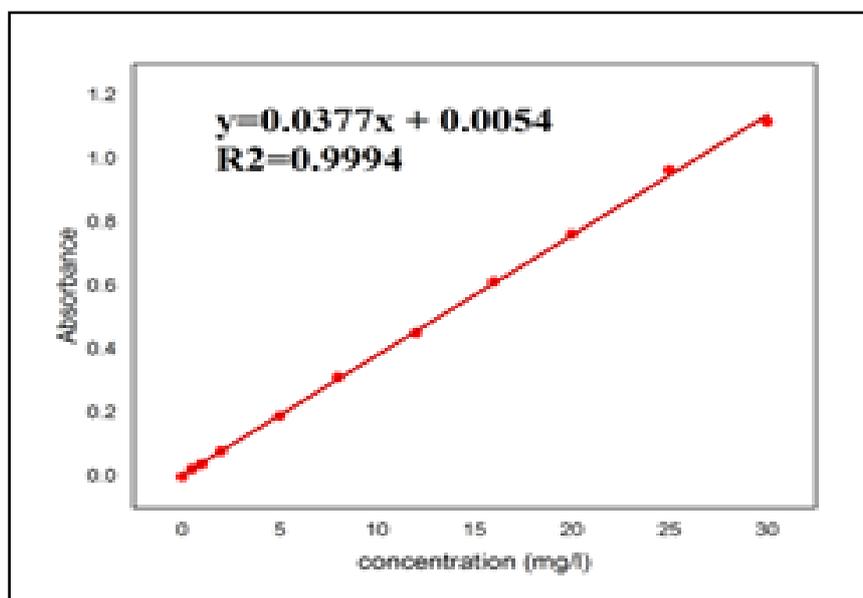


Figure III.15 : Courbe d'étalonnage de Prédnisolone.

III.5 Milieu de dilution

Le milieu de dilution adopté pour la réalisation de nos essais expérimentaux est l'eau distillée commercialisée par la société ENPEC et caractérisé par un pH varie entre 5 et 6 et une conductivité de 6,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

III.6 Description des tests d'adsorption du prédnisolone sur charbon actif

Les essais d'adsorption du Prédnisolone ont été réalisés en discontinu selon un réacteur batch sur des agitateurs magnétiques. Les solutions synthétiques d'eau distillée dopées en prédnisolone et contenant une dose du charbon actif sont agitées pendant un temps bien déterminé (Figure III.16). Les solutions synthétiques sont filtrées sous vide à l'aide d'une membrane de 0.45 μm de porosité puis dosés par spectrophotométrie afin de déterminer les teneurs résiduelles en Prédnisolone après l'essai d'adsorption.



Figure III.16 : Les essais d'adsorption du Prédnisolone sur CAP.

Dans le but d'optimiser le processus d'adsorption du Prédnisolone sur charbon actif en poudre, diverses conditions réactionnelles ont été variées à savoir le temps de contact, la vitesse d'agitation, le pH, la teneur en charbon actif, ainsi que la teneur initiale en prédnisolone.

Tableau III.2 : Conditions opératoires adoptées

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
<i>[Prédnisolone]</i>	5 – 80 mg/l
<i>[CAP]</i>	0,1 - 8g/l
<i>pH</i>	2 – 11
<i>Vitesse d'agitation</i>	250 – 1500tr/min
<i>Temps d'agitation</i>	2 à 300 min

III.7 Conclusion

Les essais expérimentaux de l'abattement de prédnisolone par adsorption sur charbon actif en poudre en eau distillée ont nécessité un spectrophotomètre pour le dosage des teneurs résiduelles en médicament, un dispositif de filtration sous vide, un pH mètre, des agitateurs magnétiques, ainsi que des instruments de pesés et de la verrerie. L'étude expérimentale a été optimisée par la manipulation des paramètres opératoires.

Chapitre IV
Résultats et discussion

IV.1 Introduction

La méthodologie expérimentale suivie au cours de la réalisation des essais expérimentaux relatifs à l'élimination de la prédnisolone par adsorption sur charbon actif en poudre en milieu aqueux, a été l'objet du chapitre trois. Par contre, le chapitre quatre sera consacré à la présentation des résultats acquis au cours des expériences effectués. L'effet de certains paramètres opératoires à savoir, la cinétique d'adsorption, l'effet la vitesse d'agitation, du pH, de la concentration d'adsorption, ainsi que de la teneur initiale en prédnisolone, a été examiné, analysé, et suivi par des discussions et des interprétations afin d'expliquer les mécanismes mis en jeu.

IV.2 Adsorption du prédnisolone sur charbon actif en solutions synthétiques

IV.2.1 Effet du temps de contact

Pour étudier l'influence du temps de contact sur l'adsorption de prédnisolone sur charbon actif en poudre (CAP), des solutions synthétiques d'eau distillée dopées en prédnisolone à 20 mg/l et enrichies par une dose d'un gramme du CAP, ont été préparées. Puis, on a suivi la variation de la quantité adsorbé du polluant durant différentes intervalles du temps (de 2 min à 5 heures). Les résultats relatifs sont exposés sur la (figure IV.1).

D'après le graphe présenté sur la (figure IV.1), on remarque que la quantité éliminée de prédnisolone augmente avec l'augmentation du temps de contact. On a pu également remarquer que l'abattement du polluant est très important dès les premières cinq minutes avec un rendement de 90%. Puis, les rendements d'élimination s'accroissent lentement jusqu'à la stabilisation à un rendement de 98% et le temps d'équilibre est estimé à une heure. Ces résultats peuvent s'expliquer par la bonne affinité qu'a le CAP vis-à-vis les particules de prédnisolone, en plus, la disponibilité des sites actifs pour adsorber le polluant favorise l'abattement rapide du polluant. La stabilisation de la quantité éliminée après un certain temps est expliquée par la saturation la surface du charbon actif utilisé.

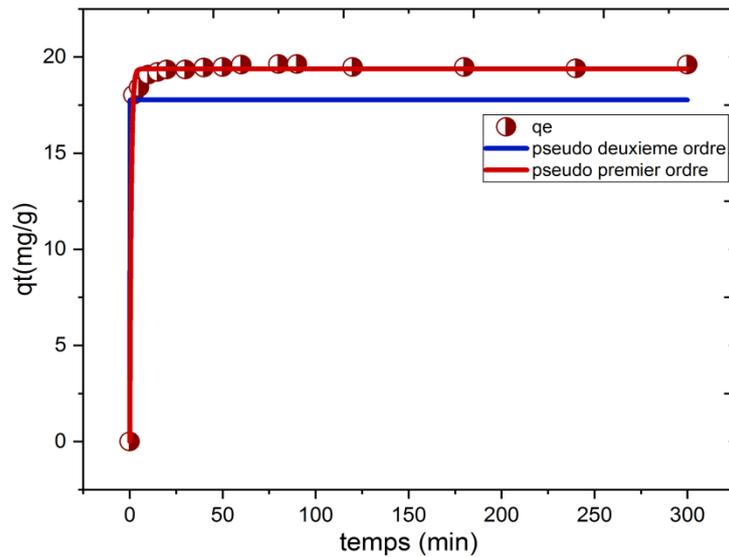


Figure IV.1 : Cinétique d'adsorption de prédnisolone sur charbon actif en poudre en eau distillée.
pH =5.41, CAP=1g/l, [P]=20 mg/

La modélisation de la cinétique d'adsorption a été effectuée en adoptant les formes non linéaires des modèles pseudo-premier-ordre et pseudo-second-ordre dont les équations non linéaires sont respectivement présentées comme suit :

1- Modèle pseudo-premier-ordre

$$q_t = q_e (1 - e^{-K_1 t}) \quad (\text{II} - 1)$$

Avec :

k_1 : la constante de vitesse du PFO (min^{-1})

q_e : la quantité du soluté adsorbée par unité de masse à l'équilibre

q_t : adsorbée à l'instant t en (mg/g).

2- Modèle pseudo-second-ordre

$$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t} \quad (\text{II} - 3)$$

Avec :

k_2 : la constante de vitesse de PS2 (g/mg.min).

q_e : la quantité du soluté adsorbée par unité de masse à l'équilibre

q_t : adsorbée à l'instant t en (mg/g).

Leurs paramètres de modélisation obtenus sont illustrés dans le Tableau IV.1. A partir de ce dernier, on peut déduire que le modèle pseudo-first-ordre exprime bien le mécanisme d'adsorption avec un $R^2 = 0.99$, et une quantité éliminée maximale calculée (Q_e) de 19.37 mg/l qui est proche de la valeur expérimentale 19.61 mg /l. Par contre, le modèle pseudo second ordre ayant un R^2 de 0.89 et une Q_e calculé de 17.76 mg/l. Les résultats acquis de la modélisation de la cinétique d'adsorption confirment que l'adsorption est physique avec la prédominance des forces de Van Der Waals et forces électrostatiques.

Tableau IV.1 : Paramètres des modèles de la cinétique d'adsorption

	Pseudo first ordre	pseudo second ordre
R carré	0.996	0.89
Chi carré	0.09	2.68
Qe (mg/g)	19.37	17.76

IV.2.2 Effet de la vitesse d'agitation

Le deuxième paramètre opératoire testé est l'effet de la vitesse d'agitation. Il a été pris en considération en raison de son influence sur le processus d'adsorption. Pour ce faire, des expériences ont été réalisées sous différentes vitesses d'agitation de 250 à 1500 tr/min ; tout en gardant les autres paramètres constants tels que temps d'équilibre (1h), la concentration de prédnisolone (20 mg/l), la teneur en charbon actif (1 g/l), le pH (5,41), ainsi que la température (25°C). Les résultats obtenus sont présentés dans la (figure IV.2). En examinant cette figure, on peut constater que les rendements d'adsorption de la prédnisolone sur le charbon actif varient entre 95% et 98,72% lorsque la vitesse d'agitation augmente de 250 tr/min à 1250 tr/min. La raison pour cette augmentation, peut s'expliquer qu'il y a une couche d'écoulement stagnante sur la surface du charbon actif et l'augmentation de la vitesse d'agitation réduit l'épaisseur du film liquide (la couche) et la résistance au transfert de masse sur la surface du charbon actif ([Hai-song Zhu et al, 2011](#)). Cependant, l'adsorption de la prédnisolone diminue lorsque la vitesse d'agitation augmente au-delà de 1250 tr/min à cause de détachement des particules de prédnisolone de charbon actif.

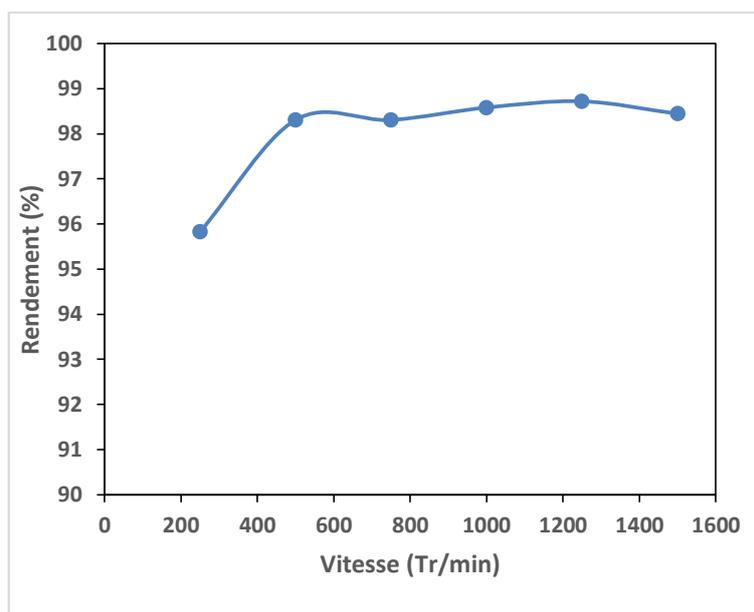


Figure IV.2 : Rendements d'élimination du prédnisolone en fonction de la vitesse d'agitation en eau distillée. $[P] = 20 \text{ mg/l}$, $[CAP] = 1 \text{ g/l}$, $\text{pH}=5.41$

IV.2.3 Effet du pH

L'effet du pH du milieu sur l'abattement de prédnisolone par adsorption sur charbon actif en poudre a été examiné sur des solutions synthétiques d'eau distillée de 20 mg/l de prédnisolone en présence de 1 g/l d'adsorbant pour des valeurs du pH comprises entre 2 et 11 pendant une heure d'agitation. Les résultats obtenus sont présentés sur la (figure IV.3).

Le processus d'adsorption dépend de la valeur du pH de la solution car le pH de la solution définit la charge de surface d'adsorbant (charbon actif) et la prédominance des espèces chimiques cationiques ou anioniques de l'adsorbat (prédnisolone). Le pH pzc du charbon actif est de 6,5. La surface du charbon est chargée négativement quand le pH de la solution est supérieur à 6,5. En revanche, elle est chargée positivement lorsque le pH de la solution est inférieur à 6,5. Dans cette étude, l'élimination de la prédnisolone est appréciable quelle que soit la valeur du pH, mais idéal dans les milieux basiques (7-10).

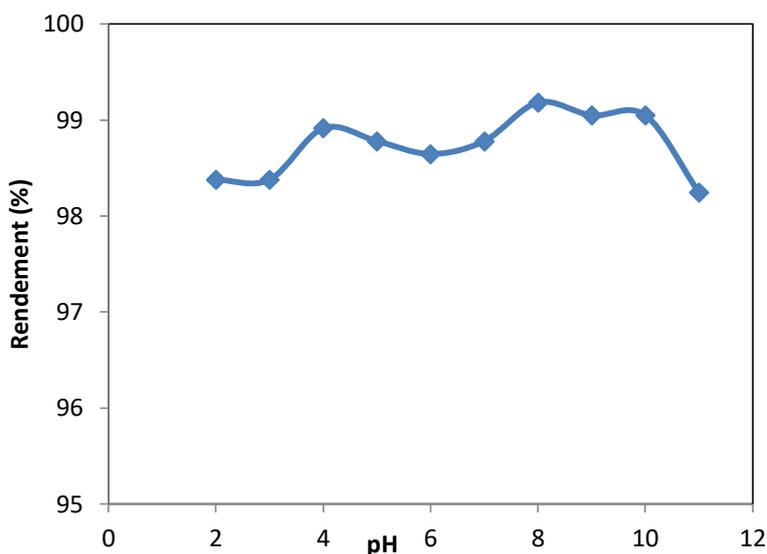


Figure IV.3 : Rendements d'élimination de prédnisolone en fonction du pH du milieu.

. [P] = 20 mg/l , [CAP] = 1g/l.

IV.2.4 Influence de la teneur en charbon actif en poudre

Pour étudier l'effet de la dose d'adsorbant sur l'adsorption de la prédnisolone, une série d'expériences d'adsorption a été réalisée avec différentes concentrations en CAP variant de 0,1 à 8 g/l, tout en gardant les autres paramètres réactionnels constants à savoir temps d'équilibre (1h), la concentration de prédnisolone (20 mg/l), la vitesse d'agitation (1250 tr/min), le pH (6,5), et la température (25°C).

La (figure IV.4) présentant les outputs acquis, montre que le pourcentage d'élimination de la prédnisolone augmente avec l'augmentation de la dose du CAP. Cette augmentation est due à l'augmentation de la surface spécifique autrement dit à l'augmentation des sites actifs sur la surface de l'adsorbant (Nasuhaet al., 2010). Cependant, la capacité d'adsorption à l'équilibre prend une direction opposée avec une diminution de la quantité adsorbée de prédnisolone par unité de masse. Lorsque la concentration de l'adsorbant augmente de 0,1 à 8 g/l, la capacité d'adsorption a été diminué de 180,53 à 2,43 mg/g. La dose optimale d'adsorbant est de 1g/l avec un rendement de 97,55%.

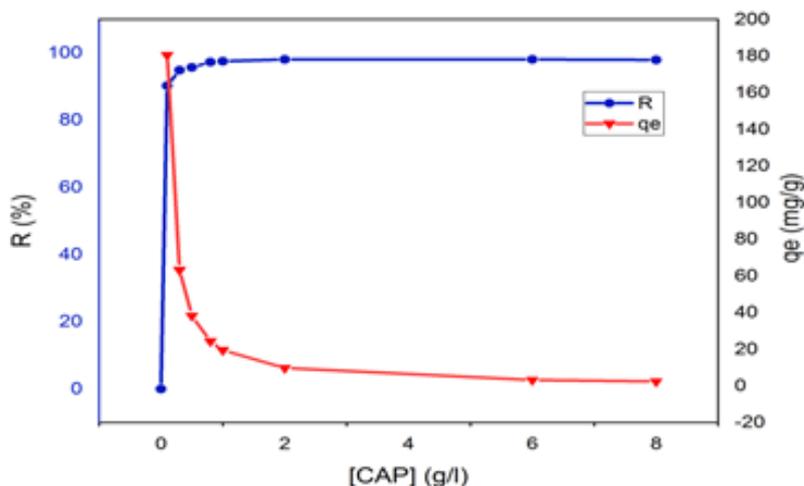


Figure IV.4 : Variation du rendement et de capacité d'adsorption en fonction de la teneur en CAP en eau distillée. pH=5.41, V =1250 tr/min, [P] =20mg/l

IV.2.5 Influence de la concentration initiale de prédnisolone

Les essais expérimentaux d'adsorption à l'équilibre ont été réalisées en batch en faisant varier les concentrations initiales en prédnisolone de 5 mg/L à 80 mg/L, comme la montre la (figure IV.5). On remarque que la quantité de prédnisolone adsorbée sur le CAP est proportionnelle à la teneur initiale en médicament testé. Il semble que la prédnisolone est rapidement retenue pour des teneurs initiales entre 1 et 30 mg/l et lentement retenue pour des teneurs supérieures. La meilleure rétention est de 19,69 mg/g enregistrée pour une dose de prédnisolone de 20 mg/l. La forte rétention du médicament par le CAP pour les faibles doses en anti-inflammatoire est expliquée par la disponibilité des sites d'adsorption à la surface du CAP. L'accroissement des teneurs en prédnisolone conduit au remplissage des sites d'adsorption ce qui implique une diminution dans le pourcentage de la rétention du polluant.

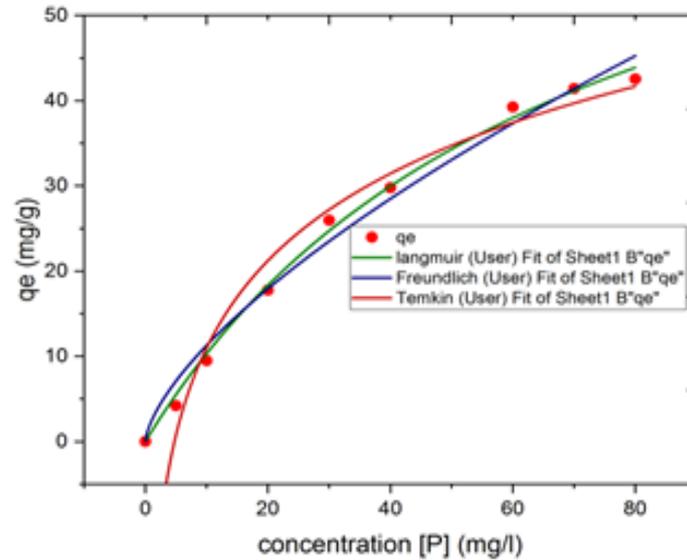


Figure IV.5 : Effet de la teneur initiale en prédnisolone sur l'adsorption sur charbon actif en poudre en eau distillée. pH=6,5 , CAP=1 g/l.

La modélisation des isothermes d'adsorption a été effectuée selon les formes non linéaires de Langmuir, Freundlich et Temkin dont les équations sont respectivement comme suit :

1- Isotherme de Langmuir

$$q_e = \frac{Q_{\max}^0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\text{II- 10})$$

Avec :

K_L : la constante d'équilibre de Langmuir (L/mg).

q_t : la capacité d'adsorption à l'instant t (mg/g).

Q_{\max}^0 : capacité maximale d'adsorption de langmuir (mg/g)

2- Isotherme de Freundlich

$$q_e = k_f \cdot C_e^n \quad (\text{II - 11})$$

Avec :

k_f : la constante d'équilibre de Freundlich (mg/g)/(mg/L)ⁿ

n : indique l'intensité d'adsorption.

$0.1 < n < 1$: il s'agit d'une bonne favorable adsorption.

$n > 1$: l'adsorption est faible.

3- Isotherme de Temkin

$$q_e = (RT/b_T) \ln(k_T.C_e) \quad (\text{II} - 12)$$

Avec :

RT/b_T est une constante liée à la chaleur d'adsorption.

k_T (l/g) : la constante qui correspond à l'énergie de liaison maximale.

R : la constante des gaz parfaits.

La modélisation non linéaire a abouti aux paramètres présentés dans le tableau IV.2. En examinant les courbes illustrées sur la (figure IV.2), on peut déduire que le modèle de Langmuir décrit parfaitement l'élimination de Prédnisolone sur le CAP avec une capacité d'adsorption maximale de 81,9 mg/l, et selon la classification de Giles l'isotherme est sous forme de H, ce qui explique la grande affinité pour la Prédnisolone.

Tableau IV.2 : les paramètres des isothermes d'adsorption

Langmuir isotherm	Freundlich isotherm	Temkin isotherm
$R^2 = 0.996$	$R^2 = 0.985$	$R^2 = 0.98$
Square Chi = 0.01	Chi carré = 4.33	Square Chi = 5.34
Q max = 81.97 mg/g	$K_f = 2.41(\text{mg/g})/(\text{mg/l})^n$	$K_T = 0.21 \text{ L/g}$
$K_L = 0.01 \text{ L/mg}$	$n_F = 1.49$	$Q = 167.958 \text{ mg/g}$

IV.3 Conclusion :

Le présent chapitre a été destiné à l'analyse, discussion, et l'interprétation de l'optimisation du processus de l'adsorption de prédnisolone sur charbon actif en poudre en eau distillée. Les résultats acquis montrent que les conditions optimales obtenus sont : un temps de contact d'une heure, une vitesse d'agitation de 1250 tr/min, une concentration du charbon actif en poudre de 1g/l, une concentration en prédnisolone de 20 mg/l, et des pH basique (7-10).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La pandémie Covid-19 qui a touché le monde entier a engendré des quantités illimitées des rejets médicamenteux notamment les antibiotiques et les anti-inflammatoires qui ont été consommés de façon abusive. Parmi les anti-inflammatoires stéroïdiens les plus consommés au niveau nationale durant la deuxième vague de cette pandémie, on cite la prédnisolone. L'objectif principal de cette étude a consisté à la détermination des performances du charbon actif pour l'élimination de prédnisolone en milieu aqueux. Le mémoire est subdivisé en deux parties dont la première a été l'objet d'une synthèse bibliographique évoquant d'une part la problématique des composés pharmaceutiques notamment les anti-inflammatoires, leurs classes thérapeutiques, leur présence dans les milieux aqueux, ainsi que leur toxicité, et d'autre part, des généralités sur le processus d'adsorption, et la modélisation de la cinétique et des isothermes d'adsorption.

En revanche, la deuxième partie du manuscrit a illustré le protocole expérimental suivi ainsi que l'analyse, la discussion, et l'interprétation des résultats obtenus.

Les outputs acquis ont mis en évidence l'appréciable affinité du charbon actif en poudre vis-à-vis le prédnisolone avec un rendement maximal de 98% pour un temps d'équilibre estimé à une heure. La modélisation de la cinétique d'adsorption a démontré que le modèle pseudo-first-order s'accorde bien avec les résultats obtenus avec un $R^2 = 0.99$, et une quantité éliminée maximale de 19.37 mg/l confirmant une adsorption physique. Une vitesse d'agitation de 1250 tr/min s'avère nécessaire afin d'optimiser l'abattement de l'anti-inflammatoire étudié. Le médicament testé est bien éliminé par le charbon actif en poudre quel que soit le pH du milieu, les meilleurs rendements d'abattement ont été enregistrés pour des pH basiques. L'effet de la teneur en CAP a montré que l'élimination de prédnisolone a augmenté avec l'accroissement des doses du CAP avec une concentration optimale de 1g/L. L'influence de la teneur initiale en médicament a dévoilé que la prednisolone est rapidement retenue pour des teneurs initiales entre 1 et 30 mg/l et lentement retenue pour des teneurs supérieures. La meilleure quantité adsorbée est estimée à 19,69 mg/g enregistrée pour une dose de prédnisolone de 20 mg/l. Concernant la modélisation des isothermes d'adsorption, les résultats acquis ont indiqué que le modèle de Langmuir décrit parfaitement l'élimination de prédnisolone sur le CAP avec une capacité d'adsorption maximale de 81,9 mg/g.

A la fin, on peut conclure que le charbon actif en poudre présente des performances assez considérables vis-à-vis l'élimination de prédnisolone en eau distillée. Cette étude ouvre une large porte pour des futures recherches pour l'application de ces résultats sur des milieux aqueux réels contenant des résidus médicamenteux en particulier les anti-inflammatoires.

Références bibliographiques

- Adriano, W.S., Veredas, V., Santana, C.C., Gonçalves, L.R.B.**, (2005), Adsorption of amoxicillin on chitosan beads: kinetics, equilibrium and validation of finite bath models, *Biochem Eng J* 27(2):132–137
- Andreozzi, R., Raffaele, M., Nicklas, P.**, (2003), Pharmaceuticals in STP effluents and their solar photo degradation in aquatic environment. *Chemosphere*; 50: 1319-30.
- Andreozzi, R., Canterino, M., Marotta, R., Paxeus, N.**, (2005), Antibiotic removal from wastewaters: The ozonation of amoxicillin, *Journal of Hazardous Materials* 122 243– 250.
- Arris, S.**, (2008) Etude Expérimentale de l'élimination des polluants Organiques Et Inorganiques Par Adsorption Sur Des Sous-Produits, Thèse de doctorat, Université de Constantine, p 30.
- Lagergren, S.**, (1898), About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *K. Sven. Vetensk. Handl.* 24 (4), 1-39.
- Abdallah, M.A.-E., Nguyen, K.H., Ebele, A.J., Atia, N.N., Ali, H.R.H., Harrad, S.**, (2019), A single run, rapid polarity switching method for determination of 30 pharmaceuticals and personal care products in waste water using Q-Exactive Orbitrap high resolution accurate mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*; 1588, 68–76.
- Azanu, D., Styrihave, B., Darko, G., Weisser, J.J., Abaidoo, R.C.**, (2018), Occurrence and risk assessment of antibiotics in water and lettuce in Ghana. *Sci. Total Environ* , 622–623, 293–305.
- Aloui, A., Zertal, A.**, (2016), Etude de l'élimination du paracétamol par le charbon actif en milieu aqueux, Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution ICEMAEP2016, 30-31.
- A.S. Mestre, J. Pires, J.M.F. Nogueira, A.P. Carvalho.**, (2007), Activated carbons for the adsorption of ibuprofen, *Carbon* 45, 1979–1988.
- Azarpira, H., et al.**, (2016), Rice husk as a biosorbent for antibiotic Metronidazole removal: Isotherm studies and model validation, *International Journal of ChemTech Research*, 9, 566-573.
- Arias M., Barral M. T., Mejuto J. C., J.**, (2002). *Chemosphere*, 48, 1081–1088.
- ^{a et b} « **Résumé des caractéristiques du produit** – prednisolone biogaran 20 mg », comprimé orodispersible - Base de données publique des médicaments » [[archive](#)], sur base-donnees-publique.medicaments.gouv.fr (consulté le 17 décembre 2017).
- Balarak, D., Mahdavi, Y., Maleki, A., Daraei, H., Sadeghi, S.Br., J.** (2016), *Pharmaceut. Res.* 10 (4) 1.

- Blanchard, G., Maunaye, M., Martin, G.,** (1984), Removal of heavy metals from waters by means of natural zeolites. *Water Res.* 18 (12), 1501-1507
- Brunauer ;**(1944), The adsorption of gases and vapors, volume 1, physical adsorption oxford university prsess, united states 511p.
- Bouchemal, F. Achour S.,**(2007), Essais d'adsorption de la tyrosine sur charbon actif engrains et en poudre, *Larhyss Journal*6, 81-89.
- Branchet, P., Castro, N.A., Fenet, H., Gomez, E., Courant, F., Sebag, D., Gardon, J., Jourdan, C., Ngatcha, B.N., Kengne, I., Cadot, E., Gonzalez, C.,** 2019. Anthropic impacts on Sub-Saharan urban water resources through their pharmaceutical contamination (Yaounde, Center Region, Cameroon). *Sci. Total Environ.* 660, 886–898.
- Benotti, M.J., Trenholm, R.A., Vanderford, B.J., Holady, J.C., Stanford, B.D., Snyder, S.A.,**(2009), Pharmaceuticals and Endocrine Disrupting Compounds in U.S. *Drinking Water.* Environ. Sci. Technol. 43, 597–603. doi: 10.1021/es801845a.
- Bendz .D,N.A. Paxeus, T.R. Ginn, F.J. Loge, J.** Hazard. Mater.(2005) 122, 195e204
- Boudermine Hania, R., Rouibah, C.,** (2020), Etude de l'Élimination de Polluants Organiques par les procédés d'Adsorption et la Photocatalyse Solaire, mémoire de master, Université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel.
- Bouziane, N.,** (2007), Élimination du 2-mercaptobenzothiazole par voie photochimique et par adsorption sur la bentonite et le charbon actif en poudre. Mémoire de Magister, Université de Constantine.
- Bruchet A., Hochereau,C., Picard,C., Decottignies,V., J.M.,** (2005),Analysis of drugs and personal care products in French source and drinking waters: the analytical challenge and examples of application,*Water Sci Technol.*
- Bernardo, M., et al.,** (2016), High efficacy on diclofenac removal by activated carbon produced from potato peel waste, Original paper, Int. J. Environ. Sci. Technol, 13, 1989–2000.
- Bounaidja,N.,** (2018), Enlèvement d'un colorant cationique à partir de solutions aqueuses par un matériau sorbant non conventionnel et à faible coût, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar -Annaba.
- Benfield, L. D., Judkins,J.F., B. L.,** (1982), Weand, Prendice Hall Inc, Englewood Cliff (N.J) 07632, 510.
- Cabal, B., Budinova, T., Ania, C.O., Tsyntsarski, B., Parra, J.B., Petrova,B.,** (2009), Journal of hazardous materials 161, 1150–1156.
- Cassan Ph, Baglin A, Frit D.,** (1976), les hyperoxaluries, Revue de médecine 17, p 803808.

- Carmona, E., Andreu, V., Picó, Y.,** (2014), Occurrence of acidic pharmaceuticals and personal care products in Turia River Basin: From waste to drinking water. *Sci. Total Environ.* 484, 53–63. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.085.
- Cofe.,** (2011), Collège français des enseignants en rhumatologie. Prescription et surveillance des anti-inflammatoires stéroïdiens et non stéroïdiens, création du document.
- Cargouët M., Perdiz D., Mouatassim-Souali A., Tamisier-Karolak S., Levi Y.,** (2004) Assessment of river contamination by estrogenic compounds in Paris area (France). *Science of The Total Environment.* 324, 55-66.
- Couderc, G.,** (2002), « Contribution à l'étude de l'adsorption binaire par les carbones non poreux et poreux », Thèse doctorat, Université de Neuchâtel. p 22.
- Dina, D.J.D., Ntieche, A.R., Ndi, J.N., Ketcha, M.J.,** (2012), *Res J Chem Sci*, 2(9), 42-49.
- Deneuve, A.,** (2010), Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg.
- Dabrowski, A., Podkoscilny, P., Z, Hubicki., M, Barczak.,** (2005), Adsorption of phenolic compounds by activated carbon—a critical review, *Chemosphere*, vol 58, 1049-1070.
- Deblonde T.,** (2011), Cossu-Leguille C, and Hartemann P. Emerging pollutants in wastewater: a review of the literature. *Int J Hyg Environ Heal*; 214:442-8
- Djidel, T.,** (2011), Etude de la préparation d'un charbon actif à partir du grain d'olives et application sur des rejets industriels, Université des Sciences et de la Technologie Med-Boudiaf d'Oran.
- Dangoumau, Jacques.,** (2006), pharmacologie générale, Département de pharmacologie - Université Victor Segalen Bordeaux 2.
- Desbiolles, F., Malleret, L., Tiliacos, C., Wong-Wah-Chung P, Laffont-Schwob I.,** (2018), Occurrence and ecotoxicological assessment of pharmaceuticals: Is there a risk for the Mediterranean aquatic environment, *Sci Total Environ*; 639: 1334-48.
- Desjardins R.,** (1990), *Le traitement des eaux* 2ème édition revue. Édition de l'école polytechnique de Montréal .
- El Azzouzi M.,** (1999). Persistance, mobilité et photodégradation de l'imazapyr dans le sol et l'eau, Thèse d'état.
- Errais, E.,** (2011), Thèse doctorat. Réactivité de surfaces d'argiles naturelles étude d'adsorption de colorants anioniques. (21/02/2011), p 26.
- Freundlich, H.,** (1906), Über die Adsorption in Lösungen. *Z Phys. Chem.* 57, 385-471.
- Gracia-Lor, E., M. Martinez, J.V. Sancho, G. Penuela, F. Hernandez.,** (2012), *Talanta* 99 1011e1023.

- Guedidi, H.**, (2015), Préparation et modification de carbones activés pour l'adsorption de polluants organiques émergents : molécules pharmaceutiques et liquides ioniques, Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar.
- Gherbi, N.**, (2008). Etude expérimentale et identification du processus de rétention des cations métalliques par des matériaux naturels. Thèse de doctorat en génie des procédés. Université de Constantine. Algérie.
- Hao, X.L., Zhang, X.W., Lei, L.C.**, (2009), Degradation characteristics of toxic contaminant with modified activated carbons in aqueous pulsed discharge plasma process, P153-161.
<https://www.sciencedirect.com/journal/carbon/vol/47/issue/1>
- Hignite, C., Azarnoff, D.L.**, (1977). Drugs and drug metabolites as environmental contaminants: Chlorophenoxyisobutyrate and salicylic acid in sewage water effluent. *Life Sc*; 20: 337-41.
- Hai-song Zhu, Xiao-juan Yang, Yan-peng Mao, Yu Chen, Xiang-li Long and Wei-kang Yuan.**, (2011), Adsorption of EDTA on activated carbon from aqueous solutions, *Journal of Hazardous Materials*, vol 185, 951–957.
- Haarstad, K., h. J. Bavoret T. Maehlum.**, (2012), Organic and Metallic Pollutants in Water Treatment and Natural Wetlands: a Review, *Water Science and Technology*, vol. 65, n° 1.
- Hadj Salah, N.**, (2013), Etude de la dégradation photocatalytique des polluants organiques en présence de dioxyde de titane, en suspension aqueuse et en lit fixe, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble et l'Université Mentouri Constantine.
- IshratJahan and MozammelMazumder.**, (2021), An Overview of the Glucocorticoids' Pathways in the environment and Their Removal Using Conventional Wastewater Treatment Systems, *Pollutants*, vol 1, 141–155.
- Jean-Marie Haguenoer.**, (2010), les résidus de médicaments présentent -ils un risque pour la santé publique, *Santé publique*, vol 22, 325 – 342.
- Kleywegt, S., et al.**, (2011), Pharmaceuticals, hormones and bisphenol A in untreated source and finished drinking water in Ontario, Canada: Occurrence and treatment efficiency". *Science of the Total Environment* 409.8 : 1481-1488.
- Khazri, H., et al.**, (2017), Removal of ibuprofen, naproxen and carbamazepine in aqueous solution onto natural clay: equilibrium, kinetics, and thermodynamic study, *Appl Water Sci*, 7 (3031–3040).
- Kermia, A. E.B., Fouial-Djebbar, D., Trari, M.**, (2016), Occurrence, fate and removal efficiencies of pharmaceuticals in waste water treatment plants (WWTPs) dis- charging in the coastal environment of Algiers. *Comp. Rendus Chim.* 19, 963-970.

Kümmerer, K., (2008), «Pharmaceuticals in the Environment – A Brief Summary»; Chapter 1. In K. Kümmerer, ed. Pharmaceuticals in the Environment. Sources, Fate, Effects and Risks. pp.3 – 21.

K. Rouibah., (2013), Valorisation de supports solides naturels : Application à l'élimination, par adsorption, de polluants organiques et minéraux dans les effluents liquides, Thèse de Doctorat, Université Mohammed Seddik Ben Yahia Jijel.

Kharfallah. A., (2003), les caractéristiques cinétiques, thermodynamique et d'équilibre de l'adsorption du bleu de méthylène sur le sable de mer, mémoire de master, université larbi ben m'hidi-oum el Boughi.

Karagoz, S., Tay, T., Ucar, S., Erdem, M., (2008), Activated carbons from waste biomass by sulfuric acid activation and their use on methylene blue adsorption, Bioresource Technology 99- 6214–6222.

Lagergren, S., (1898), About the theory of so-called adsorption of soluble substances. K. Sven. Vetensk. Handl. 24 (4), 1-39.

Langmuir, I., (1918), The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. J. Am. Chem. Soc. 40 (9), 1361-1403

Lee, H.B., T.E. Peart, M.L. Svoboda, J., (2005), Chromatogr. A 1094- 122e129.

Limoussy, L., GHOUMA, I., OUEDERNI, A., JEGUIRIM, M., (2016), Amoxicillin removal from aqueous solution using activated carbon prepared by chemical activation of olive stone, Environ Sci Pollut Res. 24:9993–10004, DOI 10.1007/s11356-016-7404-8

Lapeyre. Mestre M, Grolleau S, Monstatruc JL., (2013), Advance drug reaction associated with the use of NSAIDs. A case/non case analysis of spontaneous report from the French pharmacovigilance data base 2002_2006. *Funda clin Pharmacol.*; 27:223_3

Lettreuch R.A., (2020), Les anti-inflammatoires stéroïdiens (Corticoïdes), Les anti-inflammatoires stéroïdiens (Corticoïdes), Faculté de médecine de Blida Département de pharmacie Laboratoire de chimie thérapeutique.

Loos R., Gawlik B.M., Locoro G., Rimaviciute E., Contini S. et Bidoglio G., (2009), « EU wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters », *Environmental Pollution*, vol, 157, n°2, pp. 561-568.

Lawrence Mzukisi Madikizela, and Luke Chimuka., (2017), Simultaneous determination of naproxen, ibuprofen and diclofenac in wastewater using solid-phase extraction with high performance liquid chromatography , *Water SA* , Vol. 43, ISSN 1816-7950

- Lopez, B., Ollivier, P., Togola, A., Baran, N., Ghestem, J.-P.,** (2015), Screening of french groundwater for regulated and emerging contaminants, *Science of the total environment*, 518, 562-573.
- Loos, R., Carvalho, R., António, D.C., Comero, S., Locoro, G., Tavazzi, S., Paracchini, B., Ghiani, M., Lettieri, T., Blaha, L., Jarosova, B., Voorspoels, S., Servaes, K., Haglund, P., Fick, J., Lindberg, R.H., Schwesig, D., Gawlik, B.M.,**(2013). EU-wide monitoring survey on emerging polar organic contaminants in wastewater treatment plant effluents. *Water Res.*, 47, 6475–6487. doi:10.1016/j.watres.2013.08.024).
- Muthanna, J.A.,** (2017), Adsorption of quinolone, tetracycline, and penicillin antibiotics from aqueous solution using activated carbons: Review, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 50 1- 10.
- Meziti, C.,**(2009), « Régénération et réutilisation d'un déchet provenant de la raffinerie d'huile », mémoire de magister, Université, Abderrahmane mira de bejaia, p 38.
- Moussavi, G., Alahabadi, A., Yaghmaeian, K., Eskandari, M.,** (2013), Preparation, characterization and adsorption potential of the NH₄Cl-induced activated carbon for the removal of amoxicillin antibiotic from water, *Chem Eng J*, 217:119–128.
- Miège, C, Choubert JM, Ribeiro L, Eusèbe M, Coquery M.,** (2009), Fate of pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment plants – Conception of a database and first results. *Environ Pollut*; 157: 1721-6.
- Morère J-F, Rainfray M.,** (2007), *Cancer du sujet âgé. Springer*, 242 p.
- Mansouri, H., Carmona, R.J., Gomis-Berenguer, A., Souissi-Najar, S., Ouederni, A., Ania, C.O.,** (2015), Competitive adsorption of ibuprofen and amoxicillin mixtures from aqueous solution on activated carbons., *J Colloid Interface Sci*, 449:252–260
- Martijn, D., de Kruif, Lucienne C. Lemaire, Ida A. Giebelen et Marieke A. D. van Zoelen.,** (2017) « Prednisolone dose-dependently influences inflammation and coagulation during human endotoxemia », *Journal of Immunology (Baltimore, Md.: 950)*, vol. 178, no 3, 1er février 2007, p. 1845–1851 (ISSN 0022-1767, PMID 17237435, lire en ligne [[archive](#)], consulté le 17 décembre 2017).
- Mekraoui, M.,**(2001), « Etude de l'adsorption, de la persistance et de la biotodégradation de l'herbicide Tribenuron Méthyle (TBM) dans le sol et l'eau », Thèse doctorat, Université Mohammed V-AGDAL Rabat, p 30.
- Munshi Md, Shafwat Yazdan, Md Tanvir Ahad, Zayed Mallick, Synthia Parveen Mallick, Manvendra Patel.,** (2019), *Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods.*

- Madikizela, L. M., Chimuka, L., (2017a)**. Occurrence of naproxen, ibuprofen, and diclofenac residues in wastewater and river water of KwaZulu-Natal Province in South Africa. *Environ. Monit. Assess.* 189 <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6069-1>.
- McLintock, I., (1967)**, The Elovich equation in chemisorption kinetics. *Nature* 216, 1204-205.
- Meljac. L., (2004)**, Etude d'un procédé d'imprégnation de fibre de carbones activés modélisation des interactions entre ces fibres et le sulfure d'hydrogène, Thèse de Doctorat, Université de Jean Monnet, St-Etienne.
- Ndi, J.N., Ketcha, M.J., (2013)**, The Adsorption Efficiency of Chemically Prepared Activated Carbon from Cola Nut Shells by ZnCl₂ on Methylene Blue, *Journal of Chemistry*, 1-7.
- Nadia Soltys., (1998)**, Technique de l'ingénieur, traité génie des procédés, J3928 p. 5.
- Nasuha, N., B.H. Hameed, Azam.T and Mohd Din., (2010)**, Rejected tea as a potential low-cost adsorbent for the removal of methylene blue. *Journal of Hazardous Materials*, vol 175, 126–132.
- Olatunji, O.S., Fatoki, O.S., Opeolu, B.O., Ximba, B.J., Chitongo, R.** Determination of selected steroid hormones in some surface water around animal farms in Cape, 2017.
- Ounoki, S., Lahiouel, S., Youcef, S., Benammar, H.S., Youcef, L., Achour, S. (2020)**, Assessment of PAC's performances for the removal of amoxicillin and paracetamol in aqueous medium, *Ponte Journal*, 76(10), DOI: 10.21506/j.ponte.2020.10.3
- Pouretedal, H.R., et al., (2014)**, Effective removal of Amoxicillin, Cephalexin, Tetracycline and Penicillin G from aqueous solutions using activated carbon nanoparticles prepared from vine wood, *Journal of Water Process Engineering*, 1, 64-73.
- Putra, EK., Pranowo, R., Sunarso, J., Indraswati, N., Ismadji, S., (2009)**, Performance of activated carbon and bentonite for adsorption of amoxicillin from wastewater: mechanisms, isotherms and kinetics. *Water Res* 43(9):2419–2430.
- Patrolecco, L., N. Ademollo, P. Grenni, A. Tolomei, A. Barra Caracciolo, S. Capri, Microchem. J., (2013)**, 107- 165e171.
- Perrodin, Y., (2013)**, 16-pollution des milieux aquatiques, dans A.Euzen, L.Eymard et F.Gail, le développement durable à découvrir, CNRS édition.
- Radushkevich, L., (1947)**, Equation of the characteristic curve of activated charcoal. *Chem. Zentr.* 1 (1), 875
- Rodrigues et M.L. Janex-Hbib., (2005)**, Analysis of drugs and personal care products in French source and drinking water: the analytical challenge and example of application. *Water Sci. Technol.*, 52(8) 53-61.

- Rosal.R., Rodríguez,A., J.A. Perdigon-Mel on, A. Petre, E. García-Calvo, M.J. Gomez, A. Agüera, A.R.,**(2010), Fernandez-Alba, *Water Res.* 44 - 578e588.
- Sekirifa, M.L., M.Hadj-Mahammed.,** (2005), Etude comparative de la capacité adsorbant d'un charbon actif issu de noyaux de dattes et un charbon actif commercial, p. 55-59.
- Stavropoulos, G.G., Samaras, P., Sakellaropoulos, G.P.,** (2008), *Journal of hazardous materials* 151, 414-421.
- Soulier, C., Gabet, V., LeMenach, K., Pardon, P., Esperanza, M., Miège, C., et al.,**(2011), Zoom sur les substances pharmaceutiques : présence, partition, devenir en station d'épuration. *Techniques Sciences et Méthodes*; 1/2: 63-77.
- Siemens, J., Huschek, G., Siebe, C., Kaupenjohann, M.,** (2008) Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City–Mezquital Valley. *Water Res.* 42, 2124–2134.doi: 10.1016/j.watres. 2008, 2007.11.019.
- Santos,L.H., Gros, M., S. Rodriguez-Mozaz, C. Delerue-Matos, A. Pena, D. Barcelo, M.C.,**(2013), Montenegro, *Sci. Total Environ.* 461e 462 - 302e316.
- Simazaki, D., Kubota, R., Suzuki, T., Akiba, M., Nishimura, T., Kunikane, S.,**(2015), Occurrence of selected pharmaceuticals at drinking water purification plants in Japan and implications for human health. *Water Res.* 76, 187– 200.doi: 10.1016/j.watres. 2015.02.059).
- Stackelberg, P.E., Gibs, J., Furlong, E.T., Meyer, M.T., Zaugg, S.D., Lippincott, R.L.,** (2007), Efficiency of conventional drinking-water-treatment processes in removal of pharmaceuticals and other organic compounds. *Sci. Total Environ.* 377, 255–272.
- Saoudi, S. et al .,** (2013), Adsorption d'un colorant basique bleu de méthylène sur une argile acidifié, Mémoire de master, Université A. MIRA – Bejaïa.
- 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 Massaadia Souk -Ahras.
- Salam, I.I., T. J, Bandoz.,**Journal of colloid and interface Science., (2005), vol264, 37-312.
- Togola, A., Budzinski, H.,** (2008), Multi-residue analysis of pharmaceutical compounds in aqueous samples. *J. Chromatogr. A* 1177, 150–158.doi:10.1016/j.chroma.2007.10.105
- Tseng, R.L., Wu, F.C., Juang, R.S.,** (2003), *Carbon*, 41, 487-495.
- Talidi,A.,** (2006), Etude de l'élimination du Chrome et du bleu de méthylène en milieux aqueux par adsorption sur la pyrophyllite traitée et non traitée. Thèse de Doctorat, Université Mohamed V AGDAL.

Ternes, T.A.,(1998), Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Water Res.* 32, 3245–3260. doi:10.1016/S0043-1354(98)00099-2.

Vazquez-Roig, P., Andreu, V., Blasco, C., Picó, Y.,(2012),Risk assessment on the presence of pharmaceuticals in sediments, soils and waters of the Pego–Oliva Marshlands (Valencia, eastern Spain). *Sci. Total Environ.* 440, 24–32.doi: 10.1016/j.scitotenv, 2012.08.036.

Vulliet, E., Cren-Olivé, C., (2011), Screening of pharmaceuticals and hormones at the regional scale, in surface and groundwaters intended to human consumption. *Environ. Pollut.*159, 2929–2934. doi:10.1016/j.envpol.2011.04.033.)

Weigel.S , U. Berger, E. Jensen, R. Kallenborn, H. Thoresen, H. Huhnerfuss., (2004), *Chemosphere* 56 - 583e592.

Yahia, A.A., (2006),Activated Carbon from Dates' Stone by ZnCl₂ Activation , Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia,*JKAU: Eng. Sci*, Vol 17 No. 2, pp: 75 - 100.yhamed@kau.edu.sa

Yahiaoui,N ., (2012), Etude de l'adsorption des composés phénoliques des margines d'olive sur carbonate de calcium hydroxyapatite et charbon actif. Mémoire de magistère, Université de Tizi Ouzou.

Zeggai, S., Kherchouche, L.,(2018), Etude de l'adsorption d'un colorant textile en solutions aqueuses sur un charbon actif. Thème Master En Génie des Procédés, Génie de l'Environnement, p 45.

http://www.bichat-larib.com/publications.documents/5249_These_signee_compressee.pdf

http://campus.cerimes.fr/rhumatologie/enseignement/rhumato25/site/html/2_21_1.html<https://sante.lefigaro.fr/sante/traitement/anti-inflammatoires-non-steroidiens/mecanisme-daction>

<https://sante.journaldesfemmes.fr/fiches-medicaments/2542984-la-liste-des-anti-inflammatoires-steroidiens/>

<https://pharmacomedicale.org/medicaments/par-specialites/item/corticoides-les-points-essentiels.>

<http://politiquedesante.fr/author/olivier-toma/>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Prednisolone>

<https://www.google.com/search?q=composants+du+phénomène+d'adsorption>

<https://www.google.com/search?q=Adsorption+physique+et+chimique+&tbm>

<https://www.lenntech.fr/francais/charbonactif-grain-poudre.htm>

Références bibliographiques

<https://www.google.com/search?q=Charbon+actif+en+grain>

<https://www.donau-carbon.com/products-solutions/aktivkohle?lang=fr-FR>

<https://www.google.com/search?q=Charbon+actif+en+poudre&lien>

https://www.memoireonline.com/11/13/7701/m_L-utilisation-industrielle-du-charbon-actif5.html

<https://slidetodoc.com/ifs-sainte-marie-ple-pharmacie-les-anti-inflammatoires/>