

Degradation Solaire d'un Polluant Pharmaceutique sur un Support Photocatalytique

O. Benhabiles[#], N. Chekir, D. Tassalit, S. Mahidine, N. Kasbadji Merzouk

[#]Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 42415, Tipaza, Algérie

benhabiles.ouassila@gmail.com

Résumé— L'objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité de l'un des procédés d'oxydation avancée, la photocatalyse hétérogène, pour le traitement d'un colorant anionique de la famille des azoïques (la tartrazine) utilisé dans les industries de cosmétique (CI 19140) et pharmaceutique. Les expérimentations ont été réalisées dans un réacteur à lit fixe, le dioxyde de titane Degussa P25 a été fixé sur un support ondulé de 1m de longueur en présence de la lumière solaire comme source d'irradiation.

Les résultats obtenus ont permis d'optimiser les paramètres expérimentaux affectant la dégradation solaire de la tartrazine. Le processus photocatalytique d'une solution aqueuse de la tartrazine en présence de TiO₂ a montré que son élimination est très efficace et cette efficacité dépend de la concentration initiale du polluant, la présence du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂), ainsi que le pH de la solution. Le peroxyde de titane P25 a donné une bonne élimination du polluant en présence d'irradiation solaire qui présente plus de 98%.

Mots clés—POA; photocatalyse hétérogène; irradiation solaire; dioxyde de titane; colorant

I. INTRODUCTION

Les eaux résiduaires industrielles ont généralement une composition spécifique et directement liée au type d'industrie considéré. Les industries de textile et pharmaceutique sont les plus polluantes en termes de volume et de complexité de la composition de ses effluents, surtout les effluents de bains de teinture. Ces derniers sont caractérisés par des pH extrêmes (acides ou alcalins), une température très élevée et une grande concentration en matières colorantes.

L'évolution de l'industrie des colorants a été étroitement liée à la découverte de la mauvéine (aniline, colorant basique) par William Henry Perkin en 1856 et de la fuchsine par Verguin et al. en 1858; aujourd'hui il y a plus de 10000 colorants, ce nombre important a nécessité l'établissement d'un système de classification, un index des colorants en anglais a été mis au point par la « society of dyes and colorists (UK) » et par « American Association of textile chemists and colorists » noté (colour Index C.I.), qui décrit les caractéristiques essentielles de chaque colorant telles : leur formule chimique, leur couleur et leur nuance, leur résistance codifiée à la lumière, aux solvants, à la chaleur, aux différents agents chimiques, ainsi qu'une description des principaux domaines d'utilisation [1].

Le rejet des agents colorants dans l'eau est particulièrement indésirable non seulement à cause de leur aspect inesthétique et leur impact sur la photosynthèse des plantes aquatiques, mais

aussi parce que plusieurs colorants utilisés dans l'industrie sont toxiques (mutagènes, carcinogènes, tératogènes...) pour les êtres vivants. Sans traitement adéquat, ces colorants resteraient dans l'environnement pendant de très longues périodes.

Leur très faible biodégradabilité, due à leur poids moléculaire élevé et à leurs structures complexes, confère à ces composés un caractère toxique pouvant être élevé ou faible. De ce fait, ils peuvent persister longtemps dans ce milieu, engendrant ainsi des perturbations importantes dans les différents mécanismes naturels existant dans la flore (pouvoir d'auto épuration des cours d'eau, inhibition de la croissance des végétaux aquatiques...) et dans la faune (destruction d'une catégorie de poissons, de microorganismes...). Dans ces conditions la dose létale (DL50) reste le meilleur paramètre pour évaluer les effets toxiques causés par ces déversements. Ainsi, une DL50 signifie la mort de 50% des espèces animales testées en expérimentation [2].

Ces produits organiques sont généralement récalcitrants aux méthodes de traitement classiques et dans ces conditions, il est nécessaire de rechercher un mode de traitement adapté, c'est le cas de nombreux polluants organiques constitués de polycycle, les substitués par des groupements chlorés, sulfonés et nitrés. Beaucoup de colorants présents dans les eaux de rejets des industries de textiles et des produits pharmaceutiques font partie de cette catégorie de polluants, ils sont caractérisés aussi par de fortes variations de pH, de fortes demandes chimiques en oxygène (DCO) et une biotoxicité accrue à l'égard des bactéries.

Ces vingt dernières années beaucoup de travaux publiés dans la littérature sont consacrés à l'émergence de nouveaux procédés de traitement; parmi lesquels, les Procédés d'Oxydation Avancée (POA) occupent une place importante, en effet, elles s'avèrent très intéressantes pour la dégradation de molécules organiques récalcitrantes. Les Procédés d'Oxydation Avancée (POA) sont des procédés de traitement des eaux, dans des conditions de pression et de température ambiantes générant des radicaux fortement réactifs (spécialement des radicaux hydroxyles) en quantité suffisante pour effectuer la purification de l'eau [3].

Ces techniques sont complémentaires aux méthodes habituelles de floculation, précipitation, adsorption sur charbon actif ou procédés membranaires. L'oxydation avancée a pour but la minéralisation complète des polluants aqueux en CO₂, H₂O et autres composés minéraux.

La photocatalyse, qui fait partie des POA, est un procédé d'oxydation catalytique mettant en jeu un photocatalyseur solide et un rayonnement solaire. Ce procédé repose sur la formation des radicaux hydroxyles (OH[•]), capables de minéraliser partiellement ou en totalité la plupart des composés organiques ; il permet alors, la dégradation de molécules en phase aqueuse et il a déjà prouvé son efficacité pour la minéralisation complète de nombreux polluants des eaux comme les pesticides, les colorants ou les produits pharmaceutiques (antibiotique) [4].

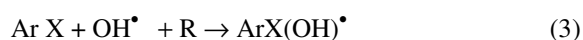
Les radicaux hydroxyles (OH[•]) réagissent avec les substituant selon trois types de réactions [5-7]. Attraction d'atome d'hydrogène :



- Transfert électronique :



- Addition électrophile :



Le semi-conducteur le plus utilisé en photocatalyse est le dioxyde de titane, il peut être en suspension ou à lit fixe. Le TiO₂ en suspension dans l'eau pose deux problèmes majeurs : la séparation du catalyseur de l'eau traitée et son recyclage. La taille des particules du TiO₂ étant de l'ordre de 50nm, le prix requis pour la séparation rend le procédé difficilement rentable à grande échelle. En effet l'économie obtenue par l'énergie solaire ne compense pas les surcoûts occasionnés par la filtration du catalyseur [8]. La décantation pourrait être une solution mais cela suppose l'utilisation d'énormes réservoirs pour le stockage de la suspension et une utilisation différée de l'eau traitée.

Une des solutions à ce problème, est de fixer le catalyseur sur un support approprié. Des travaux ont été réalisés ces dernières années entraînant d'une part l'utilisation de supports très variés (gel de silice, fibres optiques en quartz, fibre de verre, bille de verre, céramique, ciment...) et d'autre part les méthodes de dépôt de ce catalyseur [9].

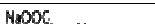
Dans ce contexte s'inscrit l'objectif de cette étude effectué au niveau de l'Unité de développement des équipements solaires (UDES) en Algérie. Le travail étudie l'efficacité de la photodégradation solaire d'un polluant utilisé dans la production des médicaments et produits cosmétiques, nommé Tartrazine dans un réacteur à lit fixe. Les résultats nous ont permis la détermination des conditions optimales de la photodégradation et de la minéralisation de la tartrazine.


II. MATERIEL ET METHODES

A. Produits chimiques

Le polluant utilisé lors de cette étude est la tartrazine ; colorant azoïque jaune de synthèse. Ses propriétés physiques et physico chimiques sont regroupées dans le tableau I.

TABLEAU I. PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES DU TARTRAZINE.

	Propriétés Physiques
---	-----------------------------

 Tartrazine	Etat Physique	Solide
	Apparence	Poudre Orange
	T° de Fusion	35 °C
	Solubilité dans l'eau	200 g/L (eau, 25 °C)
	Propriétés physico-chimiques	
Formule Chimique	C ₁₆ H ₉ N ₄ Na ₃ O ₉ S ₂	
Mass molaire	534,363 g/mol	

Le photocatalyseur utilisé lors des expériences est le dioxyde de titane TiO₂ Degussa P25, il se compose 80% Anatase et 20% de Rutile. La caractérisation du TiO₂ a été effectuée par diffraction RX, MEB et BET (Fig2. et Fig1). Les propriétés physico chimiques du TiO₂ P25 sont regroupées dans le tableau II.

TABLEAU II. PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES DU TARTRAZINE.

Apparence	Solide Blanc
Formule Chimique	TiO ₂
Masse molaire	79,87 g/mol
Surface spécifique	50 m ² /g
Diamètre moyen des particules	20.4 nm

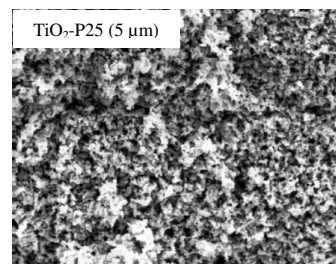


Fig. 1. Images des grains de TiO₂P25 par Microscopie Electronique à Balayage (MEB).

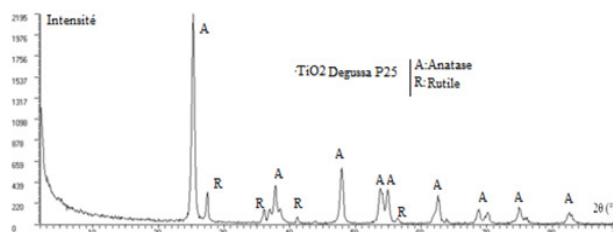


Fig. 2. Spectre de diffraction RX du TiO₂-P25

B. Installation expérimentale

Le photoréacteur solaire utilisé lors de cette étude est dimensionné pour le traitement d'un volume de cinq (5) litres d'eau polluée en circuit fermé. L'installation expérimentale est présentée sur la figure II.

L'installation se compose essentiellement d'un réacteur solaire qui est une surface ondulée et inclinée (Longueur de

1,00 m ; Largeur de 0,50 m ; Angle d'inclinaison entre 35 et 45°) sur laquelle nous avons fixé le TiO₂ par la méthode d'imprégnation. Toutes les expérimentations ont été effectuées sous rayonnement solaire direct et diffuse.

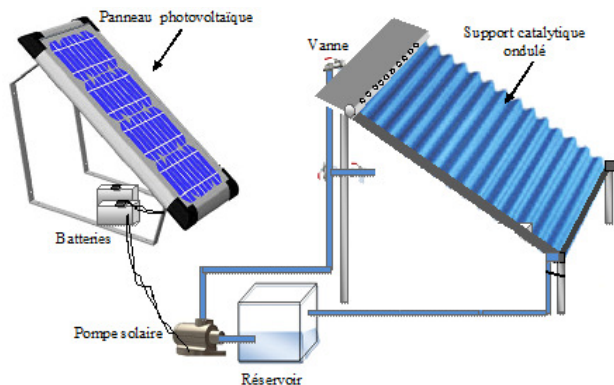


Fig. 3. Schéma de l'installation expérimentale

Une pompe à courant continu est utilisée pour la recirculation de la solution à traiter dans le réacteur. L'alimentation énergétique de la pompe de recirculation est assurée par des panneaux photovoltaïques et des batteries de stockage. L'eau polluée est pompée vers le réacteur à partir d'un réservoir d'alimentation de capacité égale à 30 L. Tout le système est lié à des Panneaux Photovoltaïques assurant l'alimentation énergétique de la pompe de circulation.

C. Méthodes d'analyse et mode opératoire

L'évolution de la concentration de la tartrazine en fonction du temps a été déterminée par un spectromètre UV-Visible à double faisceau de type Shimadzu UV1800 couplé à un logiciel d'acquisition des résultats UV PROB. La tartrazine a une absorbance maximale à une longueur d'onde $\lambda = 427$ nm.

Le flux solaire est mesuré à des intervalles de temps de 5 minutes, entre 9 heures et 15 heures, en utilisant un pyranomètre couplé à un logiciel (KIPP & ZONZN, CMP11) monté sur une inclinaison de 36°.

Le mélange réactionnel est maintenu en recirculation afin d'homogénéiser la solution à traiter. La solution passe à travers la surface ondulée sur laquelle le TiO₂ est fixé, sous rayonnement solaire, puis se déverse dans le réservoir d'alimentation. Des prélèvements de 3 ml sont effectués toutes les 15 minutes pendant 5 heures. À la fin de chaque expérience, l'installation est rincée avec de l'eau distillée.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Adsorption et photolyse de la tartrazine

Avant de procéder à l'étude de la décoloration photocatalytique de la tartrazine, nous avons jugé utile de vérifier d'abord, le taux d'adsorption du polluant sur le TiO₂ en l'absence du rayonnement solaire ainsi que le taux de dégradation de ce dernier en absence du catalyseur. L'étude de l'adsorption et de la photolyse a été effectuée pendant 270 minutes avec les conditions opératoires suivantes:

- Concentration initiale en polluant de 10 mg/L ;

- pH de la solution vari entre (5.8-6.4) ;
- Quantité de catalyseur utilisée: 0.3 mg/cm² ;
- Débit de circulation fixé à 85 mL/s.

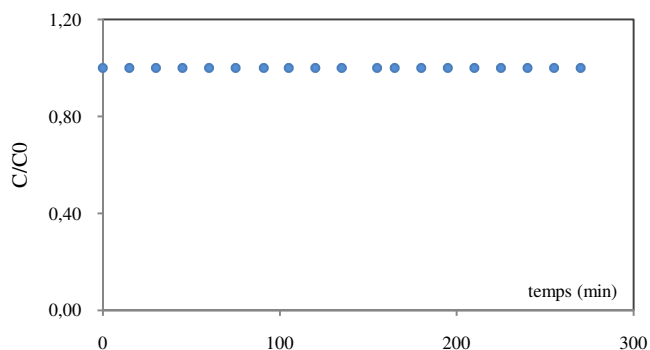


Fig. 4. Evolution temporelle de la dégradation de la tartrazine par Adsorption, C_{tartrazine} = 10 mg/L, pH libre.

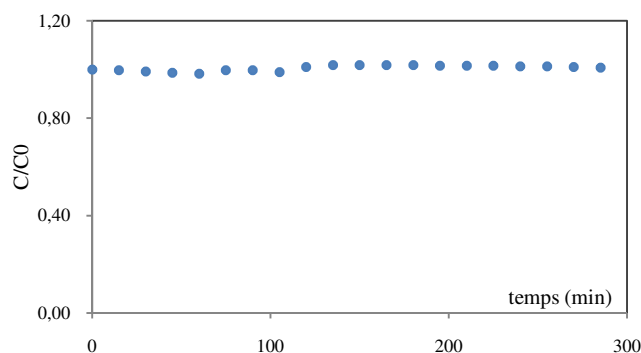


Fig. 5. Evolution temporelle de la dégradation de la tartrazine par Photolyse C_{tartrazine} = 10 mg/L, pH libre.

Les résultats obtenus montre que dans les deux cas de dégradation de la tartrazine, par adsorption ou par photolyse, le taux d'élimination est très faible, de l'ordre de 1% seulement (Fig. 4).

B. Dégradation photocatalytique de la tartrazine

Afin d'optimiser les meilleures conditions opératoires de la photodégradation de la tartrazine en présence du catalyseur Degussa P25 supporté et sous irradiation solaire, plusieurs expériences ont été réalisées en faisant varier différents paramètres à savoir : la concentration initiale en polluant ; le pH de la solution et la présence du peroxyde d'hydrogène H₂O₂.

C. Influence de la concentration initiale en tartrazine

L'étude de l'effet de la concentration initiale en tartrazine sur la vitesse de dégradation de ce dernier, a été effectuée en faisant varier la concentration initiale du polluant de 2.5 à 20 mg/L en maintenant les autres paramètres constants ; pH libre de la solution et la quantité de catalyseur supportée 0.3mg/cm². La Fig. 6 représente l'évolution des concentrations réduites en tartrazine en fonction du temps.

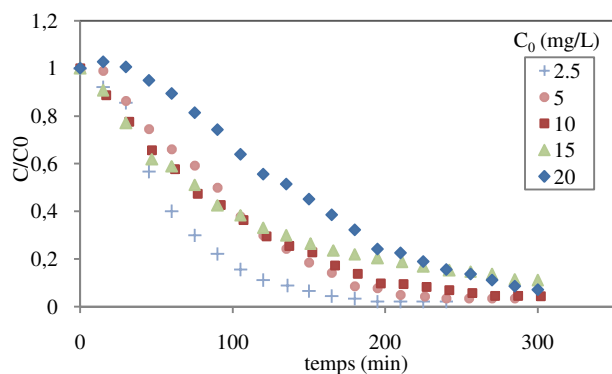


Fig. 6. Evolution temporelle de la dégradation de la tartrazine par Photolyse V=5L, Catalyseur : 0.3mg/cm²

Les résultats obtenus indiquent que la dégradation de la tartrazine est d'autant plus remarquable lorsque la concentration initiale en tartrazine diminue. Le taux de dégradation est d'environ 90% pour une durée d'irradiation solaire de moins de 300 minutes. Par ailleurs pour une faible concentration en substrat (2.5mg/L) le taux dépasse les 98% alors que pour une concentration initiale de 10mg/L et plus la dégradation a diminué jusqu'à 89%.

La dégradation du substrat est donc inversement proportionnelle à la concentration initiale de ce dernier. Ce phénomène peut s'expliquer par la diminution de la photodégradation de trous h⁺ et/ou des radicaux OH⁻ à la surface du catalyseur à cause du recouvrement des sites actifs par le polluant, ou par diminution d'intensité du rayonnement absorbé au niveau du catalyseur causé par les molécules du polluant [10].

En vue d'une meilleure compréhension du phénomène de la dégradation photocatalytique de la tartrazine, la connaissance de l'ordre de la réaction de dégradation est indispensable. Pour cela, on s'est inspiré des résultats trouvés dans la littérature expliquant que la cinétique du phénomène de photodégradation de nombreux polluants organiques obéit à une réaction d'ordre 1 dont la vitesse est décrite par l'équation suivante [11] :

$$r = \frac{dC}{dt} = -k_{app} C \quad (4)$$

Avec :

r: Vitesse de dégradation photocatalytique (mg/L.min)

kapp : Constante apparente de dégradation (min-1)

C : Concentration en solution du colorant (mg/L)

t : temps d'irradiation (min)

L'intégration de cette équation entre C₀ et C, Avec C₀: Concentration en solution du colorant quand t=0, engendre une autre équation qui donne la linéarisation :

$$-\ln \frac{C}{C_0} = k_{app} t \quad (5)$$

Le tracé du logarithme des concentrations réduites en fonction du temps pour différentes concentrations initiales en tartrazine nous a permis de vérifier cette hypothèse Fig.7. Le tracé de -ln (C/C₀) en fonction du temps (t) donne des droites,

la cinétique est d'ordre un, la concentration suit de façon satisfaisante l'expression de l'équation "(4)," dont la pente est égale à la constante apparente de vitesse kapp. Les valeurs de kapp sont présentées dans le tableau III.

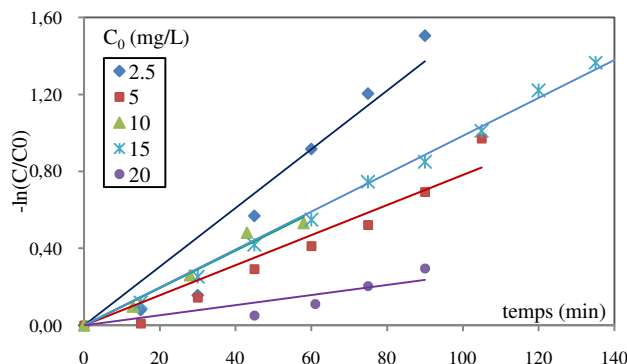


Fig. 7. Evolution de ln (C/C₀) en fonction du temps à différentes concentrations initiales de la tartrazine , pH libre, V=5L, Catalyseur : 0.3mg/cm²

La constante de vitesse (kapp) diminue avec l'augmentation de la concentration du substrat. Ce fait s'explique, par une plus faible participation de photons à mesure que la couleur de la solution devienne plus intense (c'est-à-dire plus concentré) et donc par une faible activation de TiO₂ (c'est-à-dire une faible production des radicaux OH[•]).

Les résultats obtenus montrent que la constante de vitesse de la dégradation diminue avec l'augmentation de la concentration en tartrazine, les valeurs des constantes de vitesses sont situées entre 0,0015 min⁻¹ dans le cas des concentrations les plus faibles en polluant (2,5 mg/L) et 0,003 min⁻¹ pour les concentrations assez importantes (>15 mg/L).

TABLEAU III: VALEURS DE LA CONSTANCE DE VITESSE APPARENTE POUR DIFFÉRENTES CONCENTRATIONS DU COLORANT SUR

C _{tartrazine} (mg/L)	kapp.10-3 (min-1)	R ²
2,5	15	0,93
5	7	0,95
10	10	0,99
15	9	0,75
20	3	0,99

D. Influence du pH de la solution sur la dégradation de la tartrazine

Le pH est une variable opérationnelle importante pour le traitement des eaux usées. Dans le domaine de la photocatalyse, la valeur du pH est un facteur qui influence la dégradation photocatalytique, le pH affecte énormément la charge de la surface du TiO₂ ainsi que la taille des agrégats impliquant l'ionisation de la surface de photocatalyseurs. En effet, la surface du catalyseur devient positivement chargée dans le milieu acide, négativement chargée dans le milieu

basique et neutre à pH =6,5. Pour ce dernier cas, ce point s'appelle le point de charge zéro ou (pH cpz) [12].



La distribution des espèces chimiques en fonction du pH est représentée dans le tableau IV.

TABLEAU IV: DISTRIBUTION DES ESPÈCES CHIMIQUES EN FONCTION DU PH

pH	Espèce chimique
pH < 3	TiOH ₂ ⁺ > 20 %
3 < pH < 10	TiOH > 80 %
pH > 10	TiO ⁻ > 20 %

Dans ces conditions, la dégradation photocatalytique des composés organiques ionisés est très influencée par le pH. En effet, il peut y avoir des interactions répulsives entre le polluant ionisé et la charge de la surface du catalyseur ce qui peut modifier les propriétés d'adsorption/désorption.

Afin d'étudier cette influence, nous avons procédé à des essais où nous avons maintenu la concentration de la solution à traiter à 10g/L pour différents pH de la solution (3, 5, 9 et pH libre)

Les résultats obtenus à différentes valeurs de pH sont représentés par la Fig.8. Les courbes témoignent un taux de dégradation considérable pour les quatre gammes de pH. Néanmoins, le meilleur rendement est noté lors de l'utilisation d'un pH acide, le taux de dégradation obtenu pour est de 65 % (pH 9) et 54 % (pH 3) après 300 min d'irradiation solaire.

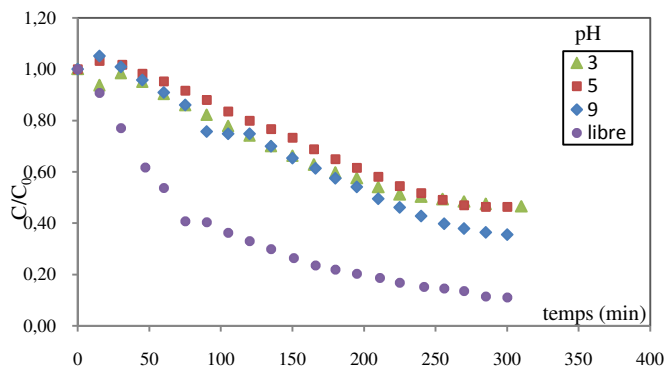


Fig. 8. Evolution de la concentration réduite de la tartrazine au cours du temps pour différents pH. Ctartrazine = 10mg/L, V=5L, catalyseur : 0.3mg/cm²

D'autre part, l'utilisation d'un pH libre de la solution à traiter à aussi donné de bon résultats pour la dégradation de la tartrazine 92%.

La cinétique de dégradation est donc plus rapide en milieu acide et à pH libre alors qu'elle décroît en milieu basique. A partir des pentes du tracé de -ln (C/C0) en fonction du temps pour différentes valeurs du pH initial de la solution nous avons déterminé les valeurs des constantes de vitesses apparentes regroupées dans le tableau V.

TABLEAU V: VALEURS DES CONSTANTES DE VITESSE APPARENTES POUR DIFFÉRENTES VALEURS DE PH.

pH	kapp.10 ⁻³ (min-1)	R ²
3	2	0.76
5	1	0.97
libre	11	0.98
9	1	0.84

E. Influence de l'ajout du peroxyde d'hydrogène

Le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) est un oxydant important, son introduction dans le milieu réactionnel accélère la dégradation photocatalytique des colorants grâce à son pouvoir oxydant et son caractère de dissociation en radicaux hydroxyles. La dégradation photocatalytique du tartrazine a été étudiée à différentes concentrations en peroxyde d'hydrogène (50, 100, 250 et 500 mg/L) tout en maintenant les conditions expérimentales constantes : Concentration initiale du tartrazine de 10 mg/L ; Quantité de dioxyde de titane 3mg/cm² ; Volume réactionnel de 5 L ; pH libre.

Les résultats représentés sur la Fig. 9 ont montré que le pourcentage de processus de décoloration du substrat, augmente avec l'élévation de la concentration de H₂O₂. Cette accélération, pourrait être liée à l'inhibition de la recombinaison d'électron-trou et également par la production de plus de radicaux OH[•] dans le milieu cela peut être Expliqué par quatre voies [13-16]:

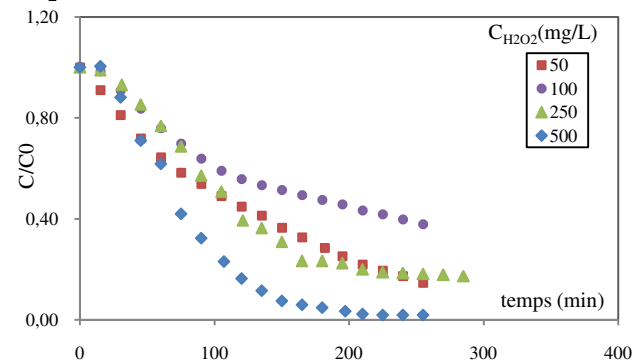


Fig. 9. Evolution de la concentration réduite de la tartrazine au cours du temps pour différentes concentrations en H₂O₂ pH libre, Ctartrazine = 10mg/L, V=5L, catalyseur : 0.3mg/cm²

Une dégradation importante de la tartrazine est notée, comme illustré sur la Fig.9 pour des concentrations H₂O₂ de 50 et 500 mg/L. Le H₂O₂ peut devenir un extracteur de trous et de radicaux hydroxyles à des concentrations élevées [17].

Selon les résultats expérimentaux représentés sur la Fig.10 le procédé de décoloration a été bien décrit par une cinétique apparente d'ordre 1 ; démontrant de ce fait, le rôle positif joué par H₂O₂. Les résultats de la cinétique de dégradation de la tartrazine sont rassemblés dans les tableau VI.

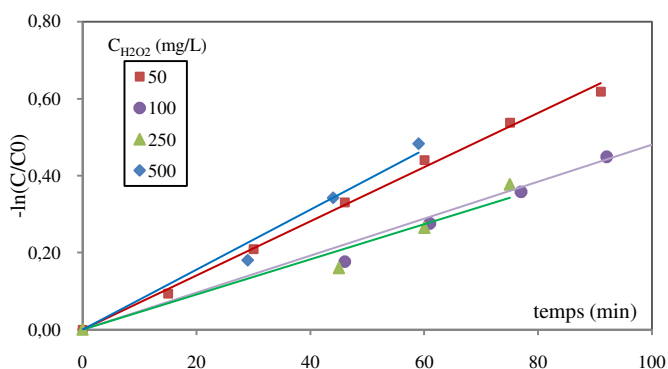


Fig.10. Evolution de la concentration réduite de la tartrazine au cours du temps pour différentes concentrations en H_2O_2 . pH libre, $C_{tartrazine}=10\text{mg/L}$, $V=5\text{L}$, catalyseur : 0.3mg/cm^2

D'après les résultats illustrés dans les tableaux VI, nous constatons que l'ajout d'oxydant a une influence négative sur le processus photocatalytique. Nous remarquons que l'augmentation en concentration d'oxydant (H_2O_2) fait diminuer la constante cinétique, pour les valeurs de 100 et 250mg/L en H_2O_2 , ainsi le taux d'abattement du colorant. Alors que pour 50 et 500 mg/l nous avons obtenus une meilleur dégradation .

TABLEAU VI: VALEURS DES CONSTANTES DE VITESSE APPARENTES POUR DIFFÉRENTES CONCENTRATIONS EN H_2O_2 .

$C_{H_2O_2}$ (mg/L)	$k_{app} \cdot 10^{-3}$ (min ⁻¹)	R^2
50	7	0.99
100	4	0.98
250	4	0.96
500	7	0.96

En général, il est rapporté que le rôle du H_2O_2 dans la dégradation photocatalytique des contaminants organiques est encore peu clair et a des effets positifs ou négatifs selon les propriétés du rayonnement (c.-à-d. longueur d'onde et intensité), le pH de la solution, les propriétés physicochimiques du contaminant, le type du catalyseur et de l'oxydant. Il est donc nécessaire de considérer tous ces paramètres dans un système H_2O_2 /polluant/ photo catalyseur [18].

IV. CONCLUSION

Le travail constitue une contribution à l'élimination par photocatalyse d'un colorant très utilisé dans l'industrie pharmaceutique, il s'agit de la tartrazine. Une étude comparative entre les différents procédés d'élimination de la tartrazine, à savoir, L'adsorption, la photolyse et la photocatalyse a montré que le procédé qui utilise le système Energie solaire/ TiO_2 s'avère être plus performant pour l'élimination de la molécule étudiée. L'étude paramétrique de la dégradation de la tartrazine en utilisant le photoréacteur à lit fixe nous a permis d'optimiser les meilleurs conditions opératoires pour avoir le meilleur rendement d'élimination de la tartrazine. Tous les paramètres étudiés ont influencé la cinétique de dégradation positivement ou négativement.

Les résultats obtenus montrent que la dégradation photocatalytique solaire du tartrazine dans le dispositif à lit fixe proposé dans cette étude est régie par plusieurs paramètres :

- Une augmentation de la concentration initiale en colorant engendre une diminution du rendement de la réaction de photodégradation ainsi que la constante de vitesse ;
- Le pH est un paramètre très significatif lors de la cinétique de dégradation photocatalytique de la tartrazine, une meilleure dégradation a été décelée dans un pH acide et un pH libre.
- La présence du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) inhibe la dégradation de la tartrazine, ceci peut être expliqué par libération excessive des ions hydroxyles OH^- , qui tend à orienter le pH de la solution vers le domaine basique, et comme constaté lors l'étude de l'influence du pH, le domaine basique est le moins rentable, en outre le (H_2O_2) accélère la vitesse de dégradation, un taux de dégradation de 99 % est atteint lors de l'ajout de 500mg/l de H_2O_2 .

En dernier lieu, nous tenons à mettre l'accent sur le fait que les taux de dégradations sont beaucoup importants en utilisant le soleil comme source lumineuse. Ce qui confère à ce procédé le qualificatif de procédé propre à énergie renouvelable. En effet, le soleil est une source d'énergie propre, abondante, inépuisable et gratuite. Ses potentialités sont considérables et fort diversifiés.

ACKNOWLEDGMENT (Heading 5)

Ce travail a été supporté financièrement par l'unité de développement des équipements solaires UDES, Epst Centre de Développement des Energies Renouvelables, Algérie.

REFERENCES

- [1] R. Perrin, S.J. pierre, "Chimie industrielle," 2eme édition, 1999.
- [2] O.Keblche, "Biodégradabilité, adsorbabilité et échange ionique de quelques colorants cationiques présents dans les effluents liquides de la teinturerie de l'unité couvortex de Ain.DJASSER," Université Mentouri Constantine, 1996.
- [3] R. Andreatto, V. Caprio, A. Insola and R. Marotta, "Advanced Oxidation Process (AOP) for Water Purification and Recovery," Cata. Today, Vol. 53, pp. 51 – 59, 1999.
- [4] H. Lachheb, E. Puzenat, H. Ammar, M. Ksibi, E. Elaloui, C. Guillard, J.M. Herrmann, "Photocatalytic degradation of various types of dyes (Alizarin S, Crocein Orange G, Methyl Red, Congo Red, Methylene Blue) in water by UV-irradiated titania," Applied Catalysis B: Environmental 39, pp. 75–90, 2002.
- [5] E. Zawlotzki guivarch, "Traitement des polluants organiques en milieu aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée "Electro-Fenton". Application à la minéralisation des colorants synthétiques", Université de Marne-La-Vallée, 2004.
- [6] M. C. Edelaoui, "Contribution à l'étude de dégradation in situ des pesticides par procédés d'oxydation avancés faisant intervenir le fer. Application aux herbicides phénylurées", Université de Marne-La-Vallée, 2004.
- [7] M. Lapertot, "A strategy for xenobiotic removal using photocatalytic treatment, microbial degradation or integrated photocatalytic-biological process," University of Dijon, 2006.
- [8] R. Mathews, "Photocatalysis in water purification: possibilities problems and prospects, photocatalytic purification and treatment of water and Air," Elsevier Science Publishers, 1993.

- [9] D.M. Blake, "Bibliography of work on the heterogeneous photocatalytic removal of hazardous compounds from water and air," Natural Renewables Energy Laboratory, 4, 2001.
- [10] J. C. SIMON, Ir B. DAUBY, "Evaluation de l'efficacité de l'oxydation avancée par photocatalyse hétérogène UV/TiO₂ sur un effluent industriel contaminé par des composés organiques non biodégradables (colorants)" Revue Scientifique des ISILF n°22, 2008.
- [11] G.T. Sauer, H.J.J. Gesconeto, Moreira., R. F. P.M., 149,147-154, 2002.
- [12] A. Piscopo, "traitement de l'eau par photocatalyse, ", Chaplins
- [13] D. Chatterjee, A. Mahata, , Journal of Photochem and Photobiol A: 153, pp199-204, 2002.
- [14] N. Daneshvar, D. Salari, A.R. Khataee, Journal of Photochem and Photobiol A:157, pp111-116, 2003.
- [15] K. Djebbar, T. Sehili, Pestic. Sci, 54, 269-276. 1998
- [16] M.A. Malouki, T. Sehili, P. Boule, Toxicol and Environ Chem, 55, pp235-246, 1995.
- [17] N.M. Mahmoodi, M. Arami, N. Yousefi Limaee, "Photocatalytic degradation of triazinic ring-containing azo dye (Reactive Red 198) by using immobilized TiO₂ photoreactor: Bench scale study", J. Hazardous Materials B133, pp113-118, 2006.
- [18] H.M. Coleman, V. Vimonses, G. Leslie, R. Amal, "Degradation of 1,4-dioxane in water using TiO₂ based photocatalytic and H₂O₂/UV processes", J. Hazardous Materials, 2007