

DEGRADATION PHOTOCATALYTIQUE DE DEUX COLORANTS SEPRES ET EN MELANGE BINAIRE PAR TiO₂-SUPPORTE

Reçu le 06/02/2008 – Accepté le 15/06/2008

Résumé

cette étude a pour objectif de vérifier l'efficacité de la photocatalyse hétérogène dans le traitement des eaux contenant soit un colorant ou un mélange de colorants. L'orange de méthyle et l'indigo carmine, colorants anioniques, sont pris comme molécules modèles dans ce travail. Une étude systématique a permis de montrer que ces molécules à l'obscurité sont adsorbées à la surface du catalyseur selon le modèle de Freundlich. La photodégradation de ces deux colorants pris séparément semble suivre une cinétique d'ordre 1. On observe en revanche un changement lorsque ces colorants sont irradiés simultanément dans un mélange. La cinétique de photodisparition de l'orange de méthyle devient d'ordre 0, alors que celle de l'indigo carmine reste inchangée. L'étude de l'effet de l'influence de la concentration de l'orange de méthyle sur la photodisparition de l'indigo carmine semble indiquer que ces molécules s'adsorbent sur les mêmes sites.

Mots clés: dégradation photocatalytique; système binaire; TiO₂ supporté sur papier.

Abstract

The objective this work was to verify the efficiency of the heterogeneous photocatalysis in the treatment of aqueous solutions containing dyes in mono and multi component mixture. The methyl orange and the carmine indigo dyes are taken as molecule models in this study. A systematic study shows that these molecules are adsorbed in the obscurity at the surface of the catalyst according to the model of Freundlich. The initial rate of the photocatalytic degradation of these dyes took separately seems to follow a kinetics of order 1. On the other hand a change when the dyes are irradiated simultaneously in a mixture was observed; the kinetics of the photocatalytic disappearance of methyl orange becomes of order 0. Whereas, the kinetic order of the photocatalytic degradation of carmine indigo remained unchanged. The investigation of the effect of the concentration of methyl orange on the photo-disappearance of the carmine indigo seems to indicate that these molecules are adsorbed on the same sites.

Keywords: Photocatalytic degradation; Multicomponent system; Textile dyes; TiO₂ Coated non-woven fibres.

N. BARKA^{a*},
A. ASSABBANE^a,
A. NOUNAH^b,
A. ALBOURINE^a
Y. AIT-ICHOU^a

^a: Département de chimie,
Faculté des Sciences d'Agadir,
BP: 8106 Hay Dakhla, Agadir,
Maroc.

^b: Laboratoire des sciences de
l'environnement, EST Salé,
BP.227, Salé-Médina, Maroc.
*E-mail : aitichou@esta.ma

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو معرفة مدى فعالية التحفيز الضوئي في الوسط الغير المتجانس في معالجة المياه الحاوية على ملون أو مجموعة من الملونات.
المثيل البرتقالي و الأنديجو كرمين ملونان أنيونيان أخذ أكتمودج في هذا العمل تدمص الجزاءان في الظلام حسب نموذج فرندلش.
كان التفكك المحفز للملونات كل حدى يتبع حركية من الدرجة الأولى و نلاحظ تغيير عند إضاءة الملونان في مزيج حيث حركية إنتفاد المثيل البرتقالي تأخذ الدرجة صفر بينما حركية إنتفاد الأنديجو كرمين لا تتغير.
دراسة تأثير تركيز المثيل البرتقالي على حركية اختفاء الأنديجو كرمين تبين كأن الجزئيات تدمصان على نفس المراجع من مرحلة واحدة.

الكلمات المفتاحية: التحلل الضوئي المحفز، نظام ثنائي ثنائية أكسيد التيتان المثبت على الورق

I. INTRODUCTION

Les rejets industriels dans les domaines énergétiques, de la production, la transformation des métaux, de l'industrie de la pâte à papier, du prétraitement ou la teinture de textile et la tannerie, portent un préjudice à notre environnement dans toutes ses composantes, air, eau et sol. Les effluents de ces activités sont chargés en produits chimiques très toxiques qui sont dans leur grande partie non biodégradables. Des directives de l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE), obligent tous les industriels à réduire fortement aussi bien les émissions atmosphériques que les effluents trop chargés. Ainsi chaque industriel est tenu d'appliquer les meilleures techniques disponibles.

Les colorants sont des composés organiques utilisés dans de nombreuses industries. Leur élimination représente un des principaux problèmes dans le processus de traitement, parce qu'ils sont généralement des composés toxiques difficilement biodégradables. Le traitement par photocatalyse est une alternative prometteuse pour l'élimination de ces composés organiques solubles. Il peut conduire à la minéralisation complète de ces composés en gaz carbonique, eau et acides minéraux dans des conditions douces de pression et de température. Contrairement aux procédés physiques (la coagulation floculation ou l'adsorption) consistant simplement en un transfert de polluants du milieu aqueux à un autre milieu, la photocatalyse hétérogène les élimine donc totalement.

La plupart des travaux réalisés sur la photodégradation sur ce type de polluants concernent généralement des solutions renfermant une seule molécule de colorant [1,5]. Or, les effluents industriels sont des matrices complexes contenant plusieurs contaminants chimiques et notamment plusieurs colorants. Dans ce travail nous nous sommes intéressés à des mélanges contenant des proportions variables d'Orange de méthyle et de l'indigo carmine.

II. MATERIELS ET METHODES

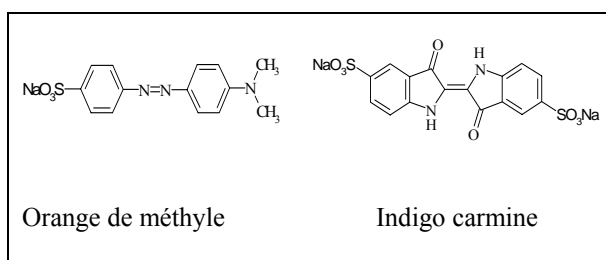
II.1. Photocatalyseur

Le catalyseur utilisé est un TiO₂ supporté sur papier. Il nous a été fourni par la firme Ahlstrom (France) (réf : 1048). C'est du dioxyde de Titane PC500 de marque Millennium inorganic chemicals S.A. (anatase: > 99%, Surface spécifique 350 à 400 m²/g, taille des particules = 5-10 nm) supporté sur des fibres naturelles et synthétiques non tissées en utilisant un liant inorganique. De la zéolite (UOP, 2000 m²/g) a été utilisée pour augmenter la surface spécifique et

améliorer ainsi les propriétés de l'adsorption du photocatalyseur. Ce photocatalyseur est testé par plusieurs équipes de recherche et semble donner de bons résultats [6-8].

II.2. Les colorants

Les colorants du type anionique utilisés dans cette étude sont l'Orange de méthyle (UGINE KUHLMANN) et l'Indigo carmine (LABOSI). Ils sont utilisés sans aucune purification préalable dans de l'eau distillé, les solutions sont préparées en dissolvant les quantités requises de chaque colorant. Les structures chimiques de ces deux colorants sont données ci-dessous.



II.3. Réacteur photocatalytique

La dégradation photocatalytique des colorants a été réalisée dans un réacteur photochimique à immersion en pyrex de capacité 500 ml avec des ouvertures destinées pour faire des prélèvements ou qui servent à l'introduction de l'oxygène. La source d'irradiation est une lampe PHILIPS HPK 125 logée dans une jaquette thermostatée avec une circulation d'eau permettant le refroidissement tout en éliminant les radiations infrarouges émises par la lampe. Le photocatalyseur est collé à l'intérieur du réacteur (papier de 11cm x 25cm). Avant son utilisation ce dernier est abondamment lavé avec de l'eau distillée. Le réacteur est ensuite chargé avec 500 ml de la solution de concentration déterminée en colorant. Il est maintenu sous agitation continue pendant un certain temps avant de commencer son irradiation.

II.4. méthodes d'analyse

Les échantillon prélevés sont filtrés sur membrane Millipore de type 0.45 µm HA. Les mesures d'absorbance ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre type JENWAY série 6405 UV/Visible. Les longueurs d'ondes des maximum d'absorption sont: 465 et 610 nm, respectivement pour l'orange de méthyle et l'indigo carmine.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 CAS DES COLORANTS SEULS

III.1.1. Cinétiques d'adsorption des colorants

Cette étude a pour objectif de vérifier si les deux colorants s'adsorbent bien sur le TiO₂ supporté. Elle nous permettra de déterminer le temps nécessaire pour atteindre l'état d'équilibre d'adsorption et d'accéder ainsi aux constantes d'équilibre d'adsorption des colorants. Les courbes de la figure 1 montrent que la quantité adsorbée augmente avec le temps d'agitation. De point de vue cinétique, les courbes montrent que l'adsorption se produit en deux étapes: une première rapide et une seconde plus lente. Pendant les quinze premières minutes, plus de 90 % de la capacité d'adsorption à l'équilibre de chaque colorant est atteinte. Au-delà, la vitesse d'adsorption devient plus lente pour s'annuler après 30 minutes de contact. Pour la suite, il est impératif de laisser l'agitation du mélange au moins pendant ce temps avant de procéder à l'irradiation du mélange. Par la suite de solution sont laissée à l'obscurité pendant une heure pour s'assurer de l'établissement de l'équilibre d'adsorption.

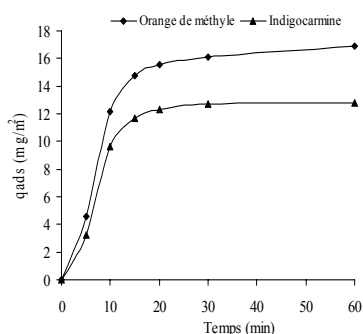


Figure 1: Cinétiques d'adsorption des deux colorants sur le catalyseur (TiO₂ PC500)

III.1. 2. Isothermes d'adsorption

Afin d'évaluer la quantité adsorbée de chaque colorant, une étude des isothermes d'adsorption a été réalisée pour des concentrations allant de 4 à 20 mg/l. Les courbes de la Figure 2 traduisent les isothermes d'adsorption à 298K.

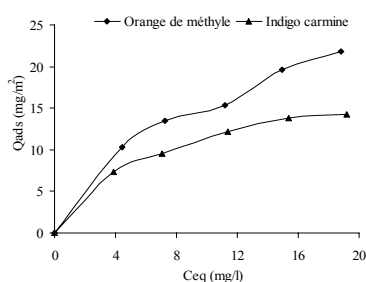


Figure 2: Isothermes d'adsorption des deux colorants sur le catalyseur

Les courbes indiquent qu'à mesure que la concentration initiale en colorant augmente, la quantité adsorbée augmente pour tendre vers une valeur limite correspondant à la quantité maximale adsorbée. Ces isothermes sont de type L selon la classification de Giles et coll. [9]. L'affinité de l'Orange de méthyle vis-à-vis du

catalyseur est plus grande par rapport à celle de l'indigo carmine.

En général, l'adsorption des composés organiques sur TiO₂ en solution aqueuse [10-12] suit le modèle de Langmuir décrit par l'expression linéaire suivante:

$$\frac{1}{Q_{ads}} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{K_{ads} \cdot Q_m} \cdot \frac{1}{C_{eq}} \quad (1)$$

Avec:

Q_{ads} : Quantité de colorant adsorbée par surface de catalyseur

Q_m : Quantité maximale d'adsorption

C_{eq} : Concentration en solution à l'équilibre de l'adsorption

K_{ads} : Constante d'adsorption spécifique de l'adsorbant sur le catalyseur

Vu l'hétérogénéité du catalyseur nous avons essayé aussi le modèle de Freundlich dont la transformée linéaire se met sous la forme

$$\ln Q = \ln K_f + 1/n_f \ln C_e \quad (2)$$

Avec:

Q: Quantité de colorant adsorbée par surface de catalyseur

C_{eq} : Concentration en solution à l'équilibre de l'adsorption

K_f et 1/n_f: Constantes de Freundlich caractéristiques de l'efficacité d'un adsorbant donné vis-à-vis d'un soluté donné.

Les différents coefficients déterminés à partir de cette droite sont regroupés dans le Tableau 1.

Le tableau montre que, les coefficients de corrélation linéaire pour le modèle de Freundlich sont plus proches de 1 que ceux du modèle de Langmuir. Il est clair qu'une simple équation de Langmuir, qui assume la présence de seulement un type de sites d'adsorption, n'est pas adaptée à nos résultats. Une meilleure corrélation des résultats a été obtenue en utilisant le modèle d'isotherme de Freundlich. Ce résultat pourrait être dû soit à l'hétérogénéité de la surface et/ou aux facteurs stériques voire électrostatiques quand le taux d'adsorption augmente. En effet, le solide catalytique comprend en plus du TiO₂, le support composé de fibres de papier, de la SiO₂ et de la zéolite. Ces composés participeraient à l'adsorption des colorants.

Adsorbât	paramètres de Langmuir			Paramètres de Freundlich		
	K_{ads} (l/g)	Q_m (mg/m ²)	r^2	K_f	$1/n_f$	r^2
Orange de méthyle	0.118	29.58	0.969	4.78	0.512	0.981
Indigo carmine	0.165	18.62	0.987	4.13	0.433	0.991

Tableau 1: Constants K_f et $1/n_f$ de Freundlich, K_{ads} et Q_m de Langmuir, et les coefficients de régression linéaire pour les deux colorants.

III.1.3. DEGRADATION PHOTOCATALYTIQUE

III.1.3.1. Cinétiques de dégradation

L'étude des cinétiques de réaction photocatalytique des deux colorants en fonction de la concentration initiale a été réalisée en faisant varier les concentrations initiales en colorants de 4 à 20 mg/l. Les figures 3 et 4 rapportent les cinétiques de photodégradation de chaque colorant avec le temps. Les courbes des figures montrent que les colorants, sous irradiation sont totalement éliminés pour les différentes concentrations. Le temps nécessaire pour l'élimination totale varie selon la concentration initiale. Notons que la photodisparition de l'Indigo carmine est plus vite que celle observée pour l'Orange de méthyle.

Les études réalisées sur l'étude cinétique de la photodégradation de nombreuses molécules organiques [13-18] indiquent d'une manière générale que ces transformations suivent une cinétique d'ordre 1 pendant les premières minutes d'irradiation dont l'intégration de la vitesse se met sous la forme .

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k_{ap} t \quad (3)$$

Les figures 5 et 6 illustrent les tracés de $\ln(C_0/C)$ en fonction du temps pour chaque colorant à différentes concentrations. Ces résultats montrent que la dégradation photocatalytique suit effectivement une cinétique du premier ordre.

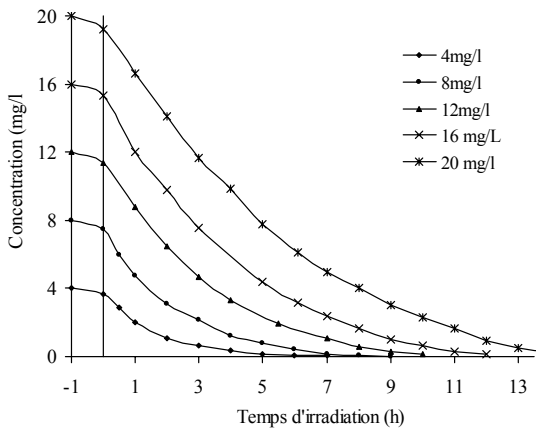


Figure 3: Cinétiques de dégradation de l'orange de méthyle à différentes concentrations initiales

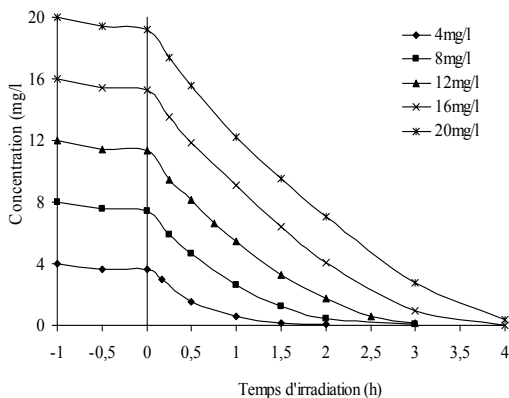


Figure 4: Cinétiques de dégradation de l'indigo carmine à différentes concentrations initiales

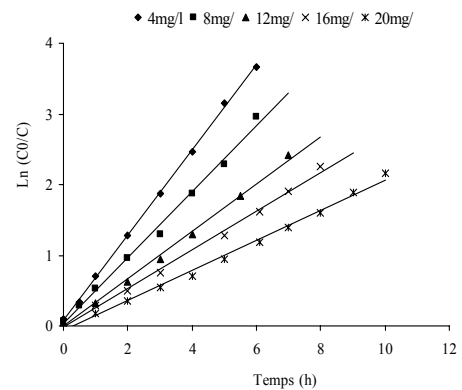


Figure 5: Tracés de $\ln(C_0/C)$ en fonction du temps d'irradiation pour l'Orange de méthyle

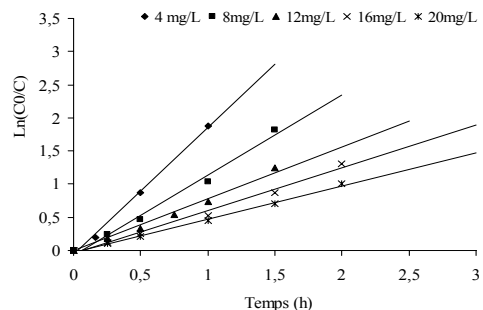


Figure 6: Tracés de $\ln(C_0/C)$ en fonction du temps d'irradiation pour l'Indigo carmine.

III.1.3.3. Effet de la concentration initial sur la dégradation photocatalytique

L'effet de la concentration initiale sur la vitesse de dégradation photocatalytique des solutions de chacun des colorants est représenté par les courbes de la figure 7. Ces résultats indiquent que la vitesse initiale de dégradation augmente avec la concentration initiale. L'allure des courbes est similaire à celle obtenue dans l'hypothèse du modèle de Langmuir–Hinshelwood [19-23] et dont l'expression de la vitesse initiale est donnée par l'équation suivante :

$$V_0 = k_{ap} C_0 = \frac{k_c K C_0}{1 + K C_0} \quad (4)$$

Avec V_0 : la vitesse initiale de dégradation (mg/l.h).
 K : la constante de l'équilibre de l'adsorption (l/mg).
 k_c : la constante de dégradation photocatalytique (mg/l.h).

La transformation linéaire peu s'écrit:

$$\frac{1}{k_{ap}} = \frac{1}{k_c} C_0 + \frac{1}{k_c K_{ads}} \quad (5)$$

Le tracé de $1/k_{ap}$ en fonction de la concentration initiale C_0 donne les lignes droites. Les pentes de ces droites sont égales à $1/k_c$ et les abscisses à l'origine sont égales à $1/k_c K$. Les valeurs trouvées des deux constantes sont représentées sur le tableau 2.

Les constantes d'équilibre d'adsorption obtenues de cette linéarisation sont différentes de celles déterminées à partir des isothermes d'adsorption. Cette différence peut être expliquée par le fait que, le support du photocatalyseur et la zéolite adsorbent les colorants. En revanche les constantes calculées à partir des cinétiques de photodégradation n'impliqueraient que les particules du dioxyde de titane. Signalons que même dans le cas où le solide catalytique n'est que du TiO₂ les valeurs sont généralement différentes à l'obscurité que sous irradiation [24-31].

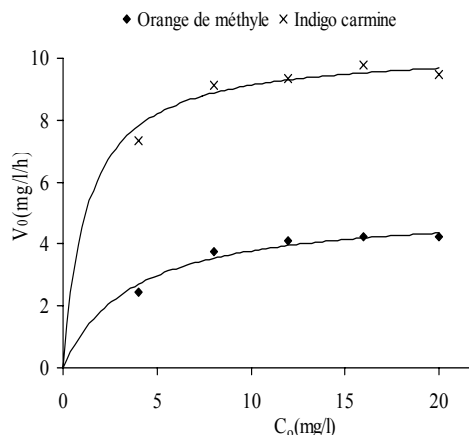


Figure 7: Effet de la concentration initiale sur la vitesse initiale de dégradation photocatalytique de chaque colorant.

Tableau 2: Constantes du model de Langmuir–Hinshelwood pour les deux colorants

Colorant	K (l/mg)	k _c (mg/l.h)
Orange de méthyle	0,276	5,147
Indigo carmine	0,787	10,288

II.2. CAS DU MELANGE DES DEUX COLORANTS

III.2.1. Adsorption du mélange sur le catalyseur

Les cinétiques d'adsorption ont été réalisées dans les mêmes conditions qu'auparavant avec des solutions contenant des mélanges des deux colorants à différentes concentrations initiales. L'analyse a été réalisée avec la colorimétrie. La mesure de l'absorbance est effectuée aux deux longueur d'ondes : 465 et 610 nm.

Les courbes de la figure 8 donnent l'évolution de la quantité adsorbée des colorants en fonction du temps pour différents rapports en concentrations initiales. On constate qu'à mesure que la concentration en indigo carmine augmente la quantité adsorbée en orange de méthyle diminue. La même chose est observée dans le cas inverse. On note toutefois que l'adsorption de l'orange de méthyle est plus affectée par la présence de l'indigo carmine que l'inverse. Les tableaux 3 et 4 donnent les quantités adsorbées à l'équilibre dans le cas des deux colorants pour des rapports en concentrations variables.

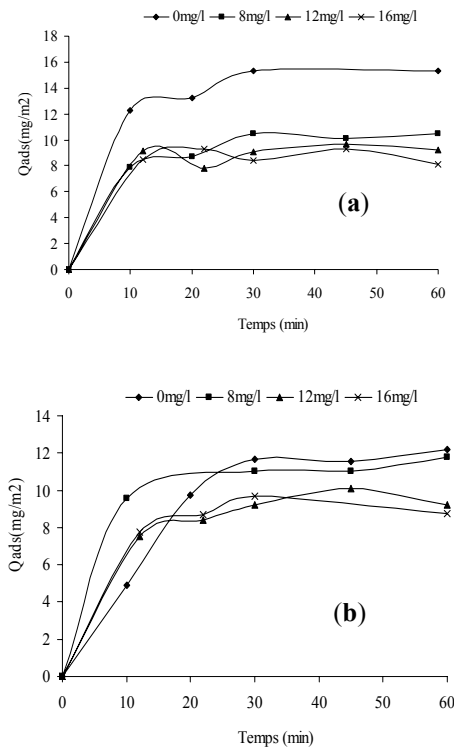


Figure 8 : Cinétiques d’adsorption des colorants pour différents rapports en concentrations initiales.
a : la concentration de l’orange de méthyle est constante (12 mg/l) et on fait varier la concentration de l’indigo carmine.
b : la concentration de l’indigo carmine est constante (12 mg/l) et on fait varier la concentration de l’orange de méthyle.

Tableau 3 : Les quantités adsorbées à l’équilibre de l’orange de méthyle pour des rapports en concentrations variables.

		Concentration de l’Indigo carmine (mg/l)			
		0	8	12	16
Concentration Orange de méthyle (mg/l)	8	13,59	7,95	6,67	6,15
	12	15,30	10,46	8,43	8,45
	16	19,64	11,15	10,23	9,41

Tableau 4 : Les quantités adsorbées à l’équilibre de l’Indigo carmine pour des rapports en concentrations variables.

		Concentration Orange de méthyle (mg/l)			
		0	8	12	16
Concentration de l’Indigo carmine (mg/l)	8	9,53	8,51	7,06	6,01
	12	12,18	11,77	9,24	8,73
	16	13,80	13,15	12,05	9,83

La description de l’effet de la concentration d’un colorant (C2) sur la quantité adsorbée à concentration initiale fixe d’un autre colorant (C1) peut être faite en utilisant l’équation suivante :

$$Q_{ads}(1) = \frac{K_{ads}(1)[C1]_{eq} Q_{max}(1)}{1 + K_{ads}(1)[C1]_{eq} + K_{ads}(2)[C2]} \quad (6)$$

Avec :

$Q_{ads}(1)$: la quantité adsorbée du colorant (C1) à l’équilibre.

$K_{ads}(1)$: Constante d’adsorption du colorant (C1).

$K_{ads}(2)$: Constante d’adsorption du colorant (C2).

$[C1]$: Concentration du colorant (C1).

$[C2]$: Concentration du colorant (C2).

La forme linéaire de cette équation est :

$$\frac{1}{Q_{ads}(1)} = \frac{1}{Q_{max}(1)} + \frac{1 + K_{ads}(2)[C2]}{K_{ads}(1)Q_{max}(1)} * \frac{1}{[C1]} \quad (7)$$

La réciproque de l’ordonnée à l’origine est égal à : $Q_{ads}(1)$, la pente de cette droite (P) est fonction de la concentration de l’autre colorant (C2). A partir des pentes obtenues à différentes concentrations du colorant (C2), on peut obtenir les autres constantes d’adsorption à l’aide de l’équation suivantes :

$$P = \frac{1 + K_{ads}(2)[C2]}{K_{ads}(1)Q_{max}(1)} \quad (8)$$

La forme linéaire de cette équation est :

$$P = \frac{1}{K_{ads}(1)Q_{max}(1)} + \frac{K_{ads}(2)}{K_{ads}(1)Q_{max}(1)} * [C2] \quad (9)$$

A partir de l’ordonnée à l’origine on obtient $K_{ads}(1)$, et de la pente on obtient $K_{ads}(2)$. Les figures 9 et 10 illustrent les tracés de cette linéarisation. Les courbes de ces figures donnent des droites, ce qui confirme l’hypothèse considérée. Le tableau 5 donne les constantes d’adsorption déterminées. Il montre que les constantes d’adsorption sont similaires à ceux déterminés dans le cas de chaque colorant seul.

Tableau 5 : Les constantes d’adsorption déterminées dans le cas de mélange de deux colorants

	Orange de méthyle	Indigo carmine
Q_{ads} (mg/g)	32,43	21,01
K_{ads} (l/g)	0,093	0,159

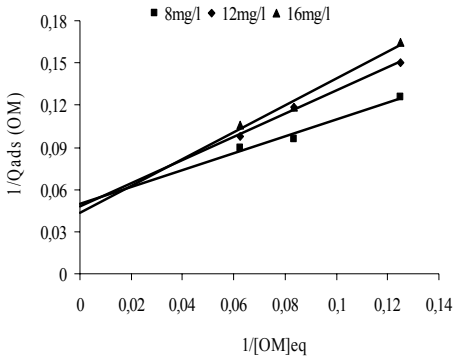


Figure 9 : Tracé de 1/Q_{ads}(OM) en fonction de 1/[OM]_{eq}.

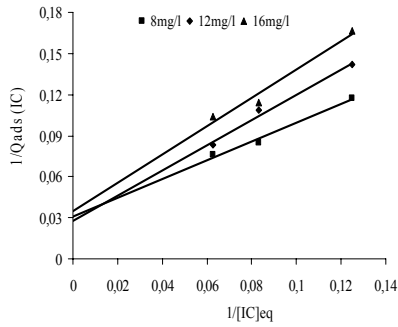


Figure 10 : Tracé de 1/Q_{ads}(IC) en fonction de 1/[IC]_{eq}.

III.2.2. Photodégradation des mélanges de deux colorants.

III.2.2.1. Cinétique de dégradation

Les cinétiques de dégradation photocatalytique ont été réalisées sur les mêmes solutions qui ont servies dans l'étude d'adsorption. Après l'adsorption à l'obscurité, les solutions sont irradiées et le suivi de la décoloration est effectué par spectrophotométrie visible. Les figures 11 et 12 montrent que, la dégradation de l'indigo carmine est plus affectée par la présence de l'orange de méthyle que la présence de l'indigo carmine avec les solutions de l'orange de méthyle.

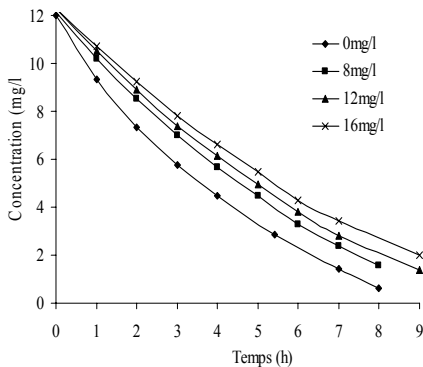


Figure 11 : Effet des concentrations croissantes en l'indigo carmine sur la cinétique de dégradation de l'Orange de méthyle.

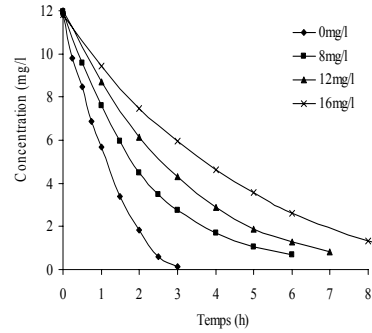


Figure 12 : Effet des concentrations croissantes en l'Orange de méthyle sur la cinétique de dégradation de l'indigo carmine.

III.2.2.2. Ordre cinétique de dégradation photocatalytique des colorants

A l'allure générale des courbes, nous avons estimé que la cinétique de disparition de l'indigo carmine serait du premier selon l'équation (3). De la même manière, en observant les cinétiques de photodégradation de l'orange de méthyle, nous constatons que les points expérimentaux forment une droite entre 0 et 6 heures d'irradiation. Ce qui serait en accord avec une cinétique d'ordre zéro selon l'équation mathématique :

$$V = -\frac{dC}{dt} = k_0 \quad (10)$$

Les tableaux 6 et 7 regroupent les constantes cinétiques du premier ordre et de l'ordre zéro et les coefficients de régression linéaire pour chaque ordre. On observe que la cinétique de photodégradation de l'Orange de méthyle change lorsque ces colorants sont irradiés simultanément dans un mélange. La cinétique de photodisparition de l'orange de méthyle devient d'ordre 0, alors que celle de l'indigo carmine reste toujours d'ordre 0. Pour expliquer la dégradation de l'indigo carmine le mécanisme de Langmuir-Hinshelwood reste une hypothèse avec une adsorption compétitive avec l'orange de méthyle. D'autres expériences sont toute fois nécessaires pour comprendre le changement de l'ordre de l'orange de méthyle qui passe de 1 à 0, respectivement seul ou en présence de l'indigo carmine.

Tableaux 6 : Effet de la concentration de l'indigo carmine sur l'ordre cinétique de la dégradation de l'orange de méthyle.

Concentration Indigo carmine (mg/l)	Premier ordre		Ordre zéro	
	kap	r ²	K ₀	r ²
0	0,3925	0,998	1,9338	0,751
8	0,1912	0,995	1,6066	0,998
12	0,1748	0,995	1,4618	0,994
16	0,1635	0,988	1,3222	0,995

Tableaux 7 : Effet de la concentration de l'orange de méthyle sur l'ordre cinétique de la dégradation de l'indigo carmine.

Concentration Orange de méthyle (mg/l)	Premier ordre		Ordre zéro	
	kap	r ²	K ₀	r ²
0	0,7182	0,997	5,0563	0,98
8	0,4865	0,998	3,4472	0,946
12	0,3577	0,996	1,9926	0,957
16	0,2421	0,996	1,5083	0,972

CONCLUSION

Cette étude a pour objectif l'étude de l'adsorption et de la photodégradation de deux colorants anioniques chacun seul et en mélange binaire. Les résultats expérimentaux montrent que les deux colorants s'adsorbent sur les mêmes sites. La disparition des deux colorants chacun seul suit une cinétique du premier ordre. Alors que, lorsqu'ils sont en mélange, l'ordre cinétique de la réaction de photodisparition de l'orange de méthyle devient égale à 0 alors que celui de l'indigo carmine reste inchangé (ordre 1).

Remerciements :

Nous remercions Monsieur Joseph DUSSAUD de Ahlstrom Research & Service pour nous avoir gracieusement fourni le photocatalyseur utilisé dans cette étude.

RÉFÉRENCES

[1] N. Barka, A. Assabbane, A. Nounah, Y. Aït ichou, J. Hazard. Mater. 152 (2008) 1054-1059.
 [2] N. Barka, S Qourzal A. Assabbane, A. Nounah, Y. Aït ichou, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 195 (2008) 346-351.
 [3] I. Bouzaida, C. Ferronato, J.M. Chovelon, M.E. Rammah, J.M. Herrmann, J. Photochem. Photobiol. A: chemistry 168 (2004) 23-30.
 [4] H. Lachheb, E. Puzenat, A. Houas, M. Ksibi, E. Elaloui, C. Guillard, J.M. Herrmann, Appl. Catal. B- Environ. 39 (2002) 75-90.
 [5] E. Bizani, K. Fytianos, I. Poullos, V. Tsiridis, J. Hazard. Mater. 136 (2006) 85-94.
 [6] A. Aguedach, S. Brosillon, J. Morvan, E.K. Lhadi, J. Hazard. Mater. 150 (2008) 250-256.
 [7] L. Lhomme, S. Brosillon and D. Wolbert, Chemosphere 70 (2008) 381-386
 [8] A. Alinsafi, F. Evenou, E.M. Abdulkarim, M.N. Pons, O. Zahraa, A. Benhammou, A. Yaacoubi and A. Nejmeddine, Dyes and Pigments 74 (2007) 439-445.
 [9] C.H. Giles, A.P. D'Silva, I.A. Easton, J. Colloid. Interf. Sci. 47 (1974) 766-778.
 [10] S.H. Kim, H.H. Ngo, H.K. Shon, S. Vigneswaran, Sep. Purif. Technol. 58 (2008) 335-342

[11] K. Sahel, N. Perol, H. Chermette, C. Bordes, Z. Derriche, C. Guillard, Appl. Catal. B-Environ. 77 (2007) 100-109
 [12] J. Arana, E. Pulido Melian, V.M. Rodriguez Lopez, A. Pena Alonso, J.M. Dona Rodriguez, O. Gonzalez Diaz, J. Perez Pena, J. Hazard. Mater. 146 (2007) 520-528
 [13] R. Mathew, S.U. Khan, J. Agric. Food Chem. 44 (1996) 3996-4000.
 [14] A.E. Kinkennon, D.B. Green, B. Hutchinson, Chemosphere 31 (1995) 3663-3671.
 [15] A.C. Gerecke, S. Canonica S.R. Muller, M. Scharer, R.P. Schwarzenbach, Environ. Sci. Technol. 35 (2001) 3915-3923.
 [16] K. Macounova, J. Urban, H. Krysova, J. Jirkovsky, J. Ludvik, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 140 (2001) 93-98.
 [17] M.M. Higarashi, W.F. Jardim, Catal. Today 76 (2002) 201-207.
 [18] K. Macounova, H. Krysova, J. Ludvik, J. Jirkovsky, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 156 (2003) 273-282.
 [19] C. Galindo, P. Jaques, A. Kalt, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 141 (2001) 47-56.
 [20] J.P. Percherancier, R. Chapelon, B. Pouyet, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 141 (1995) 47-56
 [21] A.M. Peiro, J.A. Ayllon, X. Domenech, Appl. Catal. B: Environ. 30 (2001) 359-373.
 [22] T. Sauer, G. Cesconeto, H.J. José, R.F.P.M. Moreira, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 149 (2002) 147-154.
 [23] E. Vulliet, Thèse de Doctorat. Univ. Claude Bernard-Lyon 1, Ecole Doctorale de Chimie de Lyon 1. (2002).
 [24] S. Parra, J. Olivero, C. Pulgarin, Appl. Catal. B: Environ. 946 (2001) 1-11.
 [25] R. Enriquez, P. Pichat, Langmuir. 17 (2001) 6132-6137.
 [26] A. Mills, S. Morris, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 71 (1993) 75-83.
 [27] J. Cunningham, G. Al-Sayyed, S. Srijaranai, Aquatic and surface photochemistry Chapter 22, CRC Press, (1994).
 [28] H.F. Lin, R. Ravikrishna, K.T. Valsaraj, Sep. Purif. Technol. 28 (2002) 87-102.
 [29] J. Cunningham, G. Al-Sayyed. J. Chem. Soc., Faraday Trans. 86 (1990) 3935-3941.
 [30] Y. Meng, X. Huang, X. Wang, Y. Qian, Environ. Pollution 117 (2002) 307-313.
 [31] Y. Xu, C.H. Langford, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 133 (2000) 67-71