

Élimination du Noir Eriochrome T par plasma glidarc Elimination of Eriochrome Black T by gliding arc plasma

Serge Alain Djepang, Samuel Laminsi, Iya-Sou Djakaou and Thierry Koyaouli

Volume 27, Number 1, 2014

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1021983ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1021983ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Djepang, S. A., Laminsi, S., Djakaou, I.-S. & Koyaouli, T. (2014). Élimination du Noir Eriochrome T par plasma glidarc. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27(1), 71–78. <https://doi.org/10.7202/1021983ar>

Article abstract

The elimination of an aqueous solution of Eriochrome Black T, an organic compound widely used in the textile industry, was carried out using a gliding arc plasma. This advanced oxidation process (AOP) involves the active gaseous species created in the discharge, mainly OH^\bullet radicals, its dimer H_2O_2 , and peroxyxynitrite ONOO- (a nitric oxide derivative). These species induce highly oxidizing properties which are widely used for the destruction of organic wastes. In addition to the oxidizing species, some derivatives of the NO radical (HONO and ONOOH) present in solution also confer on the plasma some acidifying properties, which accelerate the oxidation reactions. The spectrophotometric study of an Eriochrome Black T solution exposed to an electric discharge showed that an intermediate compound which absorbs at 750 nm forms at the beginning of the treatment ($t < 3$ min) with a relevant pseudo first order kinetic rate constant $k = 2.11 \text{ min}^{-1}$. After 45 min of treatment, a decolouration rate of 85.1% was obtained and the compound initially present in solution at a concentration of 15 μM was mineralized (57.3%) with a rate constant $k_1 = 0.0188 \text{ min}^{-1}$. The observation of a concurrent 67% decrease in chemical oxygen demand with a rate constant $k_2 = 0.0253 \text{ min}^{-1}$ confirms the degradation of the compound as a result of the discharge. Although the kinetics of disappearance of a more concentrated solution (150 μM) are slow ($k_3 = 0.0178 \text{ min}^{-1}$), the compound faded at 82.0% and a degradation of 86.6% was obtained for an exposure time of 50 min. Qualitative analysis performed immediately after the discharge also revealed the presence in solution of mineral ions derived from the degradation of the parent molecule.

ÉLIMINATION DU NOIR ERIOCHROME T PAR PLASMA GLIDARC

Elimination of Eriochrome Black T by gliding arc plasma

SERGE ALAIN DJEPANG¹, SAMUEL LAMINSI^{1*}, IYA-SOU DJAKAOU^{1,2}, THIERRY KOYAOUILI¹

¹Laboratoire de Chimie Minérale, Université de Yaoundé I, B.P. 812, Yaoundé, Cameroun.

²Laboratoire de Génie des Procédés Plasmas et Traitements de Surface, Université Pierre et Marie Curie, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris, France.

Reçu le 5 novembre 2012, accepté le 15 octobre 2013

RÉSUMÉ

L'élimination d'une solution aqueuse de Noir Eriochrome T (NET), composé organique largement utilisé en industrie textile, a été effectuée par plasma glidarc. Ce procédé d'oxydation avancée (POA) met en jeu les espèces gazeuses actives créées dans la décharge, principalement les radicaux OH°, son dimère H₂O₂ et le peroxy-nitrite ONOO- (dérivé de l'oxyde nitrique). Ces espèces induisent des propriétés fortement oxydantes qui sont largement employées pour la destruction de déchets organiques. Outre les espèces oxydantes, certains composés issus du radical NO° (HONO et ONOOH) et présents en solution confèrent également au plasma des propriétés acidifiantes qui accélèrent ainsi les réactions d'oxydation. L'étude spectrophotométrique d'une solution de NET (15 µM) exposée à la décharge électrique a permis de révéler qu'aux premiers instants du traitement (t < 3 min), il se forme un composé intermédiaire qui absorbe à λ = 752 nm; la cinétique de décoloration observée présente une loi de variation d'ordre global égal à un avec une constante de vitesse k = 2,11 min⁻¹. Après 45 min de traitement, un taux de décoloration de 85,1 % est obtenu. Au bout du même temps, le composé présent initialement en solution à 15 µM se minéralise à 57,3 % avec une constante de vitesse

k₁ = 0,0188 min⁻¹. L'obtention d'un abattement de 67 % de la demande chimique en oxygène (DCO) avec une constante de vitesse k₂ = 0,0253 min⁻¹ permet de confirmer que le composé se dégrade bien sous l'effet de la décharge. Par ailleurs, bien que la cinétique de disparition d'une solution plus concentrée (150 µM) soit plus lente (k₃ = 0,0178 min⁻¹), le composé se décolore à 82,0 % et un taux de dégradation de 86,6 % est obtenu après une durée d'exposition de 50 min. Les analyses qualitatives effectuées juste après arrêt de la décharge ont également révélé la présence en solution des ions minéraux issus de la dégradation de la molécule.

Mots clés : *plasma glidarc, Noir Eriochrome T, décoloration, dégradation, minéralisation, abattement.*

ABSTRACT

The elimination of an aqueous solution of Eriochrome Black T, an organic compound widely used in the textile industry, was carried out using a gliding arc plasma. This advanced oxidation process (AOP) involves the active gaseous species created in the discharge, mainly OH° radicals, its dimer

H_2O_2 , and peroxyxynitrite ONOO^- (a nitric oxide derivative). These species induce highly oxidizing properties which are widely used for the destruction of organic wastes. In addition to the oxidizing species, some derivatives of the NO radical (HONO and ONOOH) present in solution also confer on the plasma some acidifying properties, which accelerate the oxidation reactions. The spectrophotometric study of an Eriochrome Black T solution exposed to an electric discharge showed that an intermediate compound which absorbs at 750 nm forms at the beginning of the treatment ($t < 3$ min) with a relevant pseudo first order kinetic rate constant $k = 2.11 \text{ min}^{-1}$. After 45 min of treatment, a decolouration rate of 85.1% was obtained and the compound initially present in solution at a concentration of 15 μM was mineralized (57.3%) with a rate constant $k_1 = 0.0188 \text{ min}^{-1}$. The observation of a concurrent 67% decrease in chemical oxygen demand with a rate constant $k_2 = 0.0253 \text{ min}^{-1}$ confirms the degradation of the compound as a result of the discharge. Although the kinetics of disappearance of a more concentrated solution (150 μM) are slow ($k_3 = 0,0178 \text{ min}^{-1}$), the compound faded at 82.0% and a degradation of 86.6% was obtained for an exposure time of 50 min. Qualitative analysis performed immediately after the discharge also revealed the presence in solution of mineral ions derived from the degradation of the parent molecule.

Key words: *gliding arc plasma, Eriochrome Black T, decolouration, degradation, mineralization, abatement.*

1. INTRODUCTION

La dépollution des eaux usées et l'assainissement des réserves d'eau potable sont aujourd'hui une préoccupation majeure. Les procédés classiques de traitement des effluents et des polluants qu'ils contiennent s'avèrent pour la plupart inefficaces et très coûteux au regard de la complexité et de la grande quantité de rejets d'après (HONG *et al.*, 2007). La nécessité de trouver des technologies nouvelles, efficaces et économes d'énergie devient impérative. Parmi celles-ci, les technologies basées sur des décharges électriques et classées parmi les procédés d'oxydation avancée (POA) ont fait leurs preuves au laboratoire pour l'élimination de composés organiques usuels habituellement récalcitrants. L'une d'elles, la décharge glissante ou « glidarc » peut être bien adaptée à l'environnement industriel avec des coûts de fonctionnement et d'investissement modestes pour une efficacité notable (BRISSET, 2009). Le dispositif de génération de plasma type arc rampant ou glidarc a été mis au point par CZERNICHOWSKI (1994) pour le traitement des gaz. Plus tard, il fut reconnu comme source convenable pour la production de plasmas non thermiques par plusieurs laboratoires. La décharge glidarc génère un plasma non thermique dont les propriétés sont utilisées pour la dégradation des polluants. En rappel, le plasma est un milieu gazeux

électriquement neutre comportant des espèces « légères » (i.e., photons et électrons) et des espèces « lourdes » (molécules, radicaux, atomes). Cet apport énergétique provient du champ électrique et bénéficie au gaz baignant les électrodes. Il joue sur la répartition électronique des couches externes des entités gazeuses, et la modification résultante confère à l'entité des propriétés chimiques nouvelles (BRISSET, 2009). Les propriétés des entités lourdes créées dans le plasma dépendent de la nature du gaz plasmagène. Avec l'air humide, le glidarc génère les radicaux OH et NO comme espèces réactives principales qui ont été identifiées et quantifiées dans les études récentes (BENSTAALI *et al.*, 2002; DELAIR, 2004; KOSSITSYN *et al.*, 2003). Ces entités sont responsables des propriétés fortement oxydantes ($E^\circ\text{OH}/\text{H}_2\text{O} = 2,85 \text{ V/ENH}$) et acidifiantes. D'après BENSTAALI *et al.* (1998, 2002) repris par BURLICA *et al.* (2006), ces radicaux génèrent en solution d'autres espèces oxydantes à durée de vie longue telles que le H_2O_2 et l'ion peroxyxynitrite. Dans le cas de l'élimination en solution de la molécule, c'est l'effet oxydant qui sera privilégié. Il se trouve juste renforcé par l'effet acidifiant, puisque la grande majorité des systèmes oxydoréducteurs organiques impliquent la présence des protons.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Dispositif expérimental

La figure 1 représente un schéma du dispositif glidarc utilisé. Le plasma est généré entre deux conducteurs métalliques divergents reliés à un transformateur à fuite Aupem-Sefli (50 Hz, 9 Kv-100 mA à vide, intensité moyenne en fonctionnement 160 mA). Lorsque les électrodes sont soumises à une différence de potentiel convenable, un arc électrique se forme au minimum d'écartement, il est poussé par le flux gazeux et glisse le long des électrodes jusqu'à extinction lorsqu'il est court-circuité par un nouvel arc (DOUBLA *et al.*, 2007). Il se crée donc un panache d'arc formant le plasma. Le gaz plasmagène utilisé dans l'étude est l'air humide saturé en eau par l'intermédiaire d'un saturateur (débit : 13,33 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$). La distance électrode-cible D est égale à 2,5 cm. La solution traitée est agitée à l'aide d'un agitateur magnétique pour assurer l'homogénéité de la cible. La réaction entre les espèces issues de la décharge et la cible ayant lieu à l'interface liquide/gaz, une agitation efficace rend difficile l'accumulation des produits de réaction à la surface du liquide et permet d'accroître ainsi la vitesse de réaction.

Par ailleurs, le fonctionnement à pression atmosphérique de la décharge n'induit qu'un accroissement limité de la température macroscopique de la cible. Le réacteur en pyrex utilisé est à double paroi et est équipé d'un système de

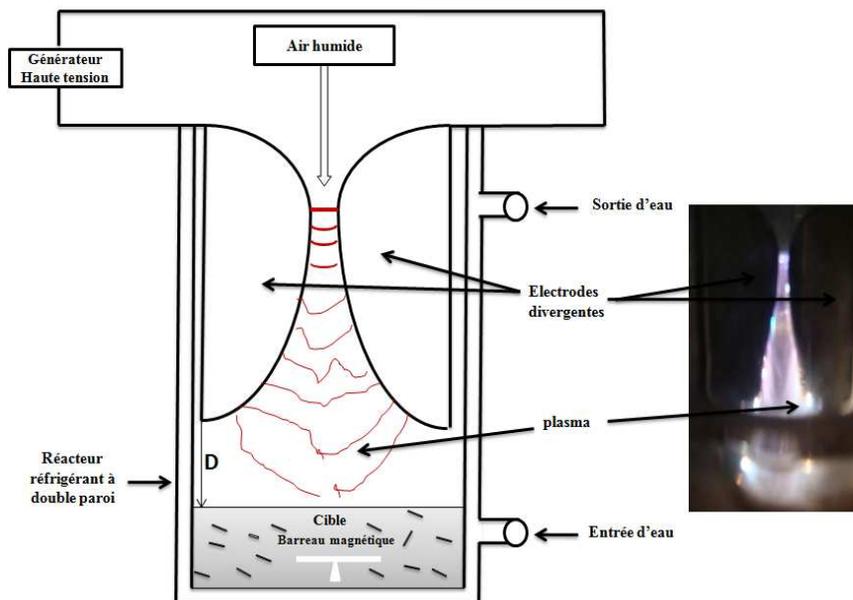


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental du réacteur glidarc utilisé.
Sketch of the experimental gliding arc reactor used.

refroidissement par une simple circulation d'eau, ce qui permet de limiter les échauffements au cours de l'exposition de la cible tout en maintenant la température du milieu réactionnel à une valeur ne pouvant excéder une trentaine de degré.

2.2 Nature du polluant

Dans cette étude la molécule cible utilisée est un colorant azoïque sulfonique appartenant à la classe des colorants acides anioniques, correspondant à la formule brute $C_{20}H_{12}N_3NaO_7S$ dont la structure est représentée à la figure 2. Il est très utilisé dans les industries textiles à cause de sa forme tinctoriale. Les solutions exposées au plasma d'arc électrique glissant sont des solutions aqueuses de NET préparées à partir de produits commerciaux. Pour effectuer le traitement, une solution de volume 430 mL est exposée à la décharge.

2.3 Méthodes d'analyses

La dégradation du Noir Eriochrome T a été suivie par la mesure du carbone organique total (COT) au moyen d'un COT-mètre Shimadzu TOC-VE après calibration. De plus, la mesure de la demande chimique en oxygène (DCO) est effectuée par lecture directe de l'échantillon préalablement préparée par une solution digestive de DCO sur un spectrophotomètre à affichage numérique HACH 3900. Les mesures spectrophotométriques d'absorption UV-visible ont également été réalisées au pic d'absorption du composé

($\lambda = 525$ nm). Quant aux analyses qualitatives, elles ont été effectuées par les différentes méthodes classiques d'identification des ions en solution et de piégeage du dioxyde de carbone.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Mesures spectrophotométriques

L'exposition à la décharge d'une solution de concentration $1,5 \cdot 10^{-5}$ mol.L⁻¹ pour des durées t^* courtes ($t^* < 5$ min) montre immédiatement qu'après arrêt de la décharge, l'absorbance mesurée au pic d'absorption du composé (525 nm) diminue, ce qui est bien traduit par la figure 3.

Le spectre UV-visible obtenu pour les différentes durées de traitement montre qu'à partir de 0,5 min, le pic principal à 525 nm décroît. L'évolution du spectre après 2 min d'exposition à la décharge fait ressortir de manière plus précise l'existence d'un pic à 752 nm, caractéristique de la formation d'un composé intermédiaire qui proviendrait de la rupture de la liaison azoïque (-N = N-), car cette liaison est souvent présentée comme le site le plus actif lors des attaques oxydatives (BENSTAALI *et al.*, 1998; BENHNAJADY *et al.*, 2006). Cet intermédiaire, sous l'effet de la décharge, disparaît très vite après 3 min de traitement (3-45 min); on assiste à une très forte décroissance du pic principal qui tend à disparaître

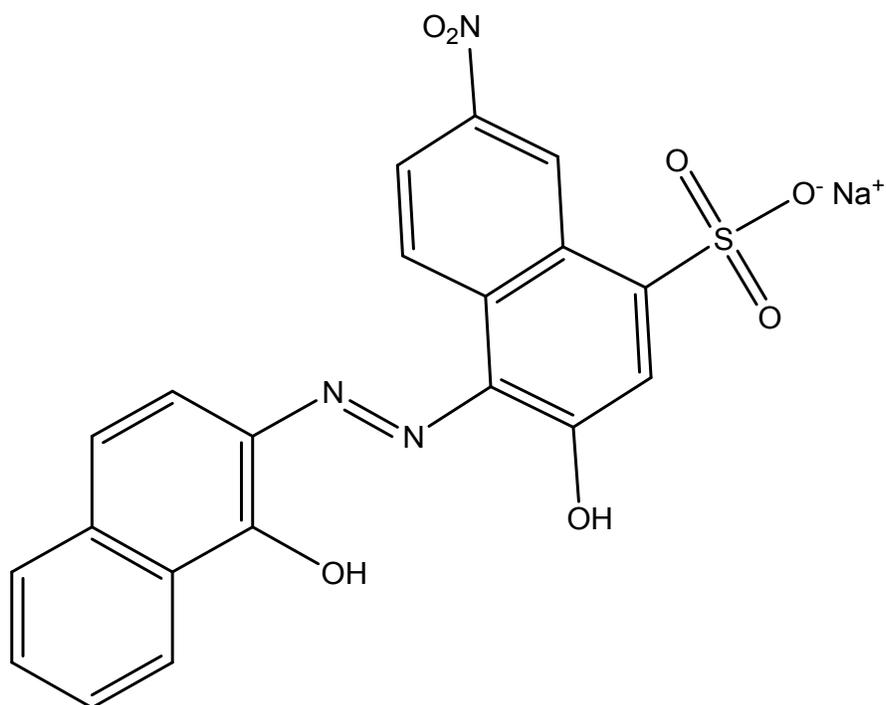


Figure 2. Structure du Noir Eriochrome T, sel sodique.
Structure of Eriochrome Black-T, sodium salt.

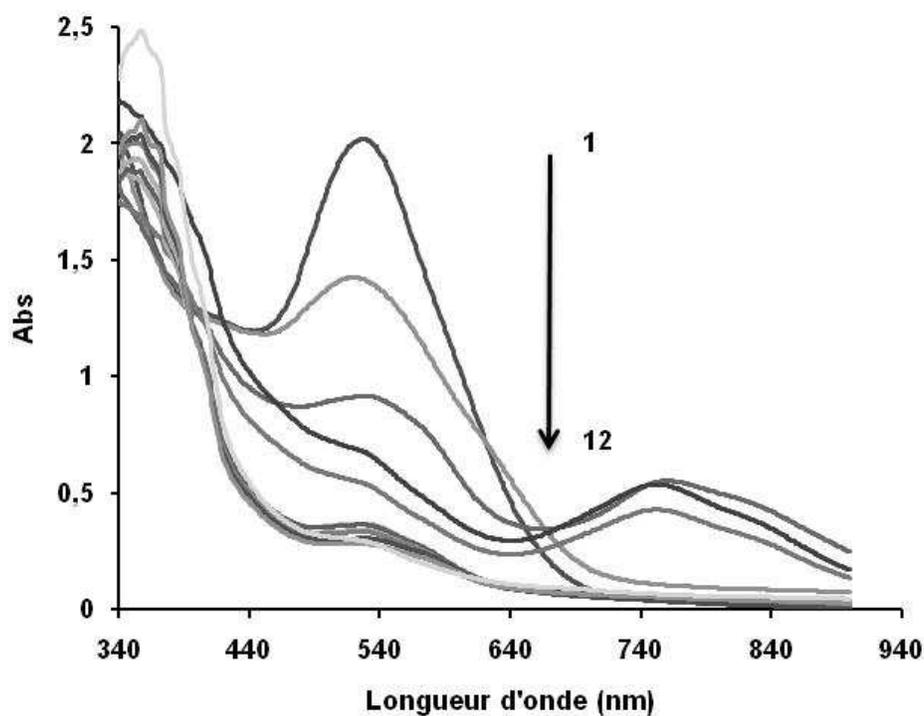


Figure 3. Spectre UV- visible d'une solution de NET traitée par plasma : 1 : 0 min, 2 : 0,5 min, 3 : 1 min, 4 : 1,5 min, 5 : 2 min, 6 : 3 min, 7 : 5 min, 8 : 9 min, 9 : 12 min, 10 : 15 min, 11 : 30 min, 12 : 45 min.
UV-visible spectrum of a NET solution treated by plasma 1: 0 min, 2: 0.5 min, 3: 1 min, 4: 1.5 min, 5: 2 min, 6: 3 min, 7: 5 min, 8: 9 min, 9: 12 min, 10: 15 min, 11: 30 min, 12: 45 min.

complètement. Ce résultat montre que le Noir Eriochrome T se dégrade effectivement sous l'effet de la décharge.

L'évolution de l'absorbance à $\lambda = 525$ nm obtenue sur la courbe de la figure 4 fait apparaître un profil présentant une partie monotone décroissante entre 0 et 1 min correspondant à une forte baisse de l'absorbance, une partie concave transitoire et une partie horizontale qui se présentent sous forme de plateau et qui traduiraient la consommation totale des espèces oxydantes créées ou activées par le plasma (BENSTAALI *et al.*, 1998; MOUSSA *et al.*, 2007). Cette diminution de l'absorbance montre également que les chromophores responsables de la coloration sont détruits progressivement. Un taux de décoloration de 67 % est obtenu au bout de 4 min de traitement. Ce taux de décoloration a été enregistré pour une densité d'énergie estimée à 56 kJ.L^{-1} . Il en résulte ainsi un pouvoir dégradant de l'ordre de 29 g.kWh^{-1} .

Pour préciser le rôle de la quantité d'énergie sur la cinétique de la réaction, nous avons tracé les variations de la fonction $\text{Ln}(A-A_{\text{inf}})$ aux premiers instants d'exposition ($0 < t^* < 2$ min) en décharge continue (Figure 5). La courbe obtenue présente une loi de variation d'ordre global égal à 1, avec une constante de vitesse $k = 2,11 \pm 0,03 \text{ min}^{-1}$, cette constante vient davantage montrer que les cinétiques de réaction de décoloration par plasma de colorants azoïques sont très rapides pour les solutions diluées (GUIVARCH *et al.*, 2003; MOUSSA *et al.*, 2007).

Par ailleurs, une solution de NET, présente initialement à $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$, soit $150 \mu\text{M}$, se dégrade à 86,6 % au bout de 50 min de traitement (Figure 6). La décroissance dans le temps de la concentration présente une allure exponentielle et donc des variations linéaires de $\text{Ln } C/C_0 = f(t^*)$, ce qui indique

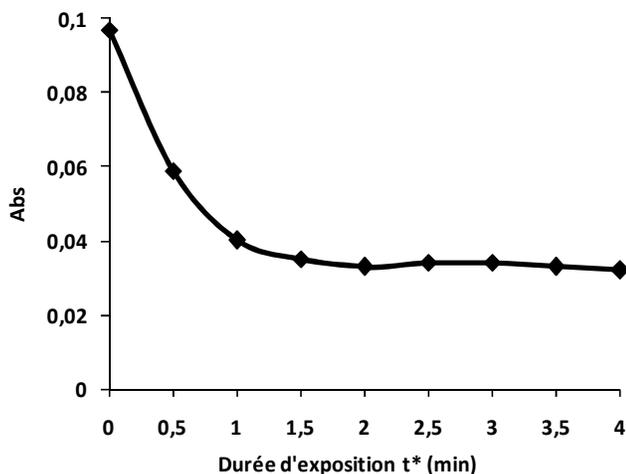


Figure 4. Évolution de l'absorbance en fonction de la durée d'exposition.
Evolution of absorbance as a function of exposure time.

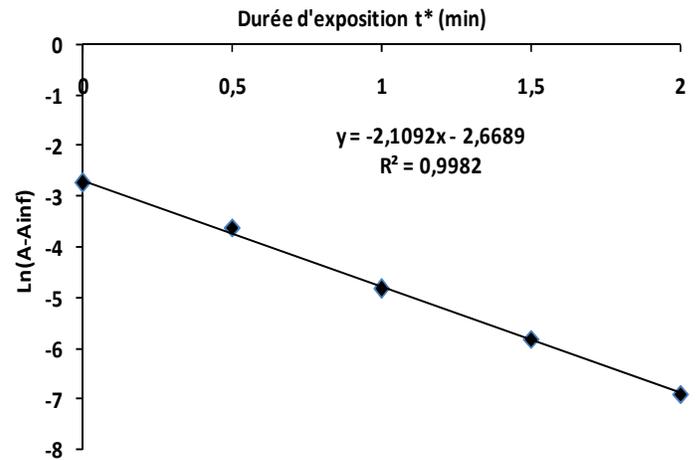


Figure 5. Expression logarithmique de l'absorbance en fonction de la durée d'exposition ($0 < t^* < 2$ min).
Logarithmic expression of the absorbance as a function of exposure time ($0 < t^ < 2$ min).*

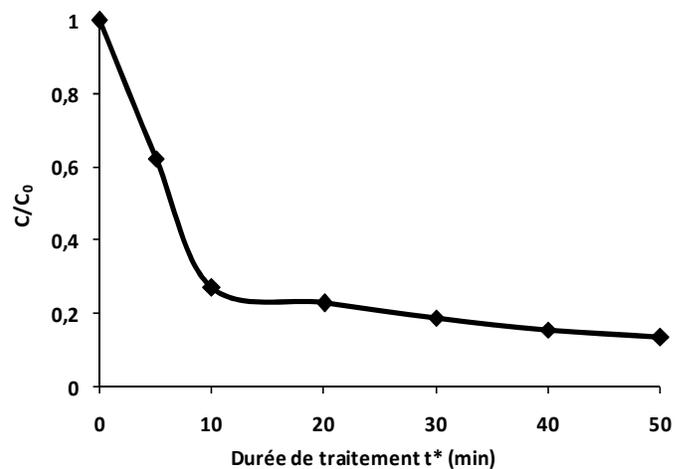
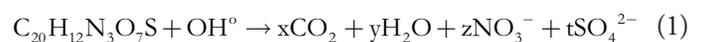


Figure 6. Cinétique de dégradation du Noir Eriochrome T en solution aqueuse ($C = 150 \mu\text{M}$).
Degradation kinetics of an aqueous solution of Eriochrome Black T ($C = 150 \mu\text{M}$).

que la transformation suit une cinétique d'ordre apparent 1 ($C = C_0 e^{-kt}$).

On va par la suite considérer au cours de cette partie la cinétique d'hydroxylation du Noir Eriochrome T contribuant à la dégradation du colorant. La réaction entre les radicaux hydroxyles et le NET est présentée ci-dessous.



Ainsi, la vitesse de disparition du colorant aura la forme suivante :

$$V = -\frac{d[C_{20}H_{12}N_3O_7S]}{dt} = k_{app} \times [C_{20}H_{12}N_3O_7S]^\alpha \quad (2)$$

$$\Rightarrow \int_{[C_{20}H_{12}N_3O_7S]_0}^{[C_{20}H_{12}N_3O_7S]} \frac{d[C_{20}H_{12}N_3O_7S]}{[C_{20}H_{12}N_3O_7S]} = \int_0^t k_{app} dt \quad (3)$$

Si $\alpha = 1$ (premier ordre) alors $\text{Ln} \frac{[C_{20}H_{12}N_3O_7S]}{[C_{20}H_{12}N_3O_7S]_0} = k_{app} \times t \quad (4)$

Par conséquent, pour vérifier l'ordre de notre réaction, on va tracer la courbe illustrant le $\text{Ln} \frac{[C_{20}H_{12}N_3O_7S]}{[C_{20}H_{12}N_3O_7S]_0} = f(t)$ pour les différents temps de traitement réalisés selon la figure 7.

On constate que le coefficient de corrélation de la courbe est proche de l'unité et comme les radicaux OH° sont non cumulatifs car leur durée de vie est très courte (quelques centaines de ns), il en résulte que la concentration en radicaux hydroxyles dans la solution est maintenue quasi stationnaire (vitesse de consommation = vitesse de formation) et, par conséquent, la réaction d'hydroxylation du NET est considérée comme une cinétique de pseudo-premier ordre (ABDELMALEK *et al.*, 2006). On en déduit, selon les molécules considérées, puisqu'il s'agit d'un phénomène de diffusion en solution, dont la vitesse est affectée par la composition du milieu, que les radicaux OH° jouent un rôle important dans le processus de dégradation de la molécule. La constante apparente de la cinétique de disparition du NET obtenue est de $0,0178 \text{ min}^{-1}$. Cette constante est

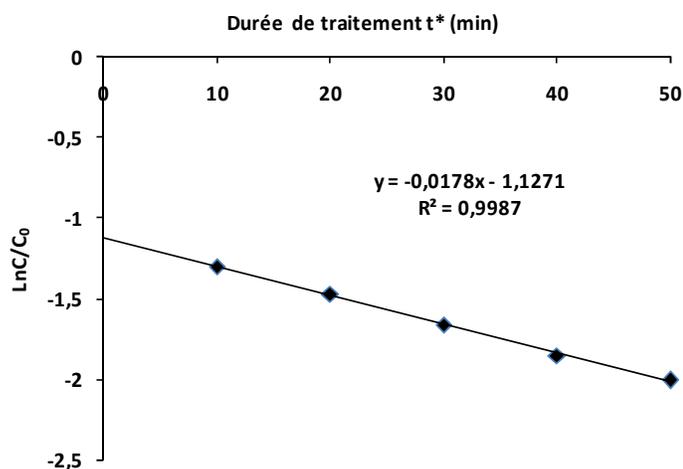


Figure 7. Variation de $\text{Ln} C/C_0$ en fonction de la durée de traitement. Variation of $\ln (C/C_0)$ as a function of treatment time.

similaire à diverses autres constantes obtenues dans les études portant sur la dégradation des colorants azoïques par plasma où elles varient de $0,008 \text{ min}^{-1}$ à $0,033 \text{ min}^{-1}$ (ABDELMALEK *et al.*, 2004; GHEZZAR *et al.*, 2007).

3.2 Mesure du carbone organique total

Les résultats expérimentaux regroupés dans la figure 8 montrent un accroissement rapide du taux d'abattement du COT qui croît avec le temps d'exposition à la décharge. On obtient après 45 min de traitement un taux de minéralisation de 57,3 %. Cette variation est une preuve de la minéralisation du NET sous l'action des espèces réactives générées par le plasma d'air humide. L'abattement obtenu révèle l'efficacité de notre technique à décomposer le NET. Cette décomposition résulterait premièrement de la rupture de la liaison (-N = N-), puis de la formation des produits d'hydroxylation du NET sous l'action des radicaux hydroxyles.

La performance du glidarc est démontrée par une diminution exponentielle du COT pour ($0 < t^* < 45 \text{ min}$). Les valeurs du COT permettent d'établir les paramètres cinétiques de minéralisation déduits de la figure 6. Nous obtenons globalement une cinétique d'ordre 1 et une constante de vitesse $k_1 = 0,0188 \text{ min}^{-1}$.

3.3 Suivi de la demande chimique en oxygène

Compte tenu du fait que les effluents textiles sont très chargés en DCO, on se propose d'étudier son évolution après exposition du colorant textile (solution aqueuse) à la décharge électrique. Notons que la mesure de la DCO constitue également un bon indicateur de l'efficacité de la minéralisation. La variation de la DCO a été suivie au cours du temps de traitement. D'après la courbe de la figure 9, on remarque que la DCO diminue progressivement avec la durée de traitement. Après 45 min d'exposition à l'effluage électrique, nous obtenons un abattement de 67,2 %. La décroissance de la DCO confirme la minéralisation qui peut s'expliquer par la conversion des composés aromatiques en aliphatiques suite à l'ouverture des cycles benzéniques (BELHADJ et SAVALL, 1999; CALINDO *et al.*, 2000; OTURAN, 2001). Elle indique également qu'au contact de la décharge électrique il y a eu oxydation du NET en ions minéraux (NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_2 et H_2O) en solution (MALETZKY et BAUER, 1998; TANAKA *et al.*, 2000).

L'étude cinétique de la dégradation du NET évaluée par le tracé du logarithme des valeurs de la DCO obtenues en fonction du temps d'exposition (Figure 9), a conduit à l'obtention d'une cinétique de réaction d'ordre 1 avec une constante de vitesse de $0,0253 \text{ min}^{-1}$.

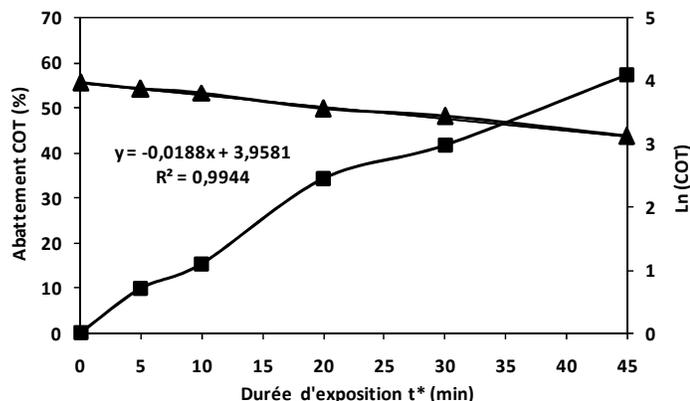


Figure 8. Abatement du COT et cinétique en fonction de la durée de traitement ((■) COT (%), (▲) Ln (COT)).
TOC abatement and kinetics of the reaction as a function of treatment time ((■) COT (%), (▲) Ln (COT)).

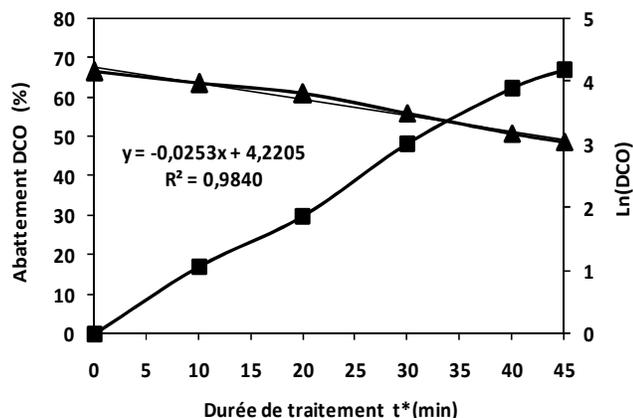


Figure 9. Abatement de la DCO et cinétique en fonction de la durée de traitement ((■) DCO (%), (▲) Ln (DCO)).
COD abatement and kinetics of the reaction as a function of treatment time((■) COD (%), (▲) Ln (COD)).

3.4 Analyses qualitatives

Après arrêt de la décharge, nous avons pu identifier la présence du dioxyde de carbone à l'aide de tubes dosimètres Dräger. La formation d'ions ammonium a été attestée par un test positif au réactif de Nessler. De même, l'application du test au $BaCl_2$ à une aliquote de notre solution traitée par plasma a montré la formation d'un précipité blanc résistant à l'action de l'acide chlorhydrique dilué ou concentré, ce test indique qu'il s'est formé du $BaSO_4$, et établit donc l'existence d'ions sulfates en solution. Ces résultats qualitatifs sont en accord avec les diverses hypothèses avancées sur la minéralisation de NET.

4. CONCLUSION

La décharge électrique glissante d'air humide permet de générer des espèces radicalaires très oxydantes à pression atmosphérique et température modérées. Cette technique peut ainsi être utilisée avec succès et proposée comme solution pour la dégradation du Noir Eriochrome T, en particulier, et celle des molécules de la famille des composés azoïques. La formation d'un composé intermédiaire au cours du traitement révèle qu'il y a eu rupture de la liaison $N = N$, la présence des ions minéraux en solution confirme le caractère oxydant du plasma d'air humide utilisé, qui se traduit par la présence et le rôle des radicaux OH présents dans la décharge. La destruction du polluant obéit à une cinétique de premier ordre. Le plasma glidarc constitue donc une technologie efficace pour l'élimination des polluants.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Fondation Internationale pour la Science pour le soutien matériel et scientifique apporté pour la réalisation de ce travail (programme FIS 2010 No: W/4219-1) offert à Nzali Serge, l'unité de recherche Wastewater Research Unit de l'Université de Yaoundé I pour les analyses effectuées, ainsi que le Professeur Émérite Jean-Louis BRISSET de l'Université de Rouen pour son soutien matériel et sa contribution dans l'élaboration de ce travail de recherche.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADBELMALEK F., M.R. GHEZZAR, M.N. BELHADJ, A. ADDOU et J.L. BRISSET (2006). Bleaching and degradation of textile dyes by non-thermal plasma process at atmospheric pressure. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 23-29.
- ADBELMALEK F., S. GHARBI, B. BENSTAALI, A. ADDOU et J.L. BRISSET (2004). Plasmachemical degradation of azo dyes by humid air plasma: yellow supranol 4 GL, scarlet red nylosan F3 GL and industrial waste. *Water Res.*, 38, 2339-2347.
- BELHADJ T. et A. SAVALL (1999). Mecanistic aspect of phenol electrochemical degradation by oxidation on Ti/PbO₂ anode. *J. Electrochem. Soc.*, 145, 3427.
- BENHNAJADY M.A., N. MODIRSHAHLA et H. FATHI (2006). Kinetics of decolorization of an azo dye in UV

- alone and UV/H₂O₂ processes. *J. Hazardous. Mater.*, B136, 816-821.
- BENSTAALI B., D. MOUSSA, A. ADDOU et J.L. BRISSET (1998). Plasma treatment of aqueous solutes: some chemical properties of a gliding arc in humid air. *Eur. Phys. J. AP*, 4, 171-179.
- BENSTAALIB., P. BOUBERT, B.G. CHERON, A. ADDOU et J.L. BRISSET (2002). Density and rotational temperatures measurements of the NO° and HO° radicals produced by a gliding arc in humid air and their interaction with aqueous solution. *Plasma Chem. Plasma Proc.*, 22, 553-571.
- BRISSET J.L. (2009). *La foudre en bouteille. Décharges électriques glissantes à la pression atmosphérique et leurs applications à l'environnement*. Union des professeurs de physique et de chimie, France, Vol 103.
- BURLICA R., M. KIRKPATRICK et B.R. LOCKE (2006). Formation of reactive species in gliding arc discharges with liquid water. *J. Electrostat.*, 64, 35-43.
- CALINDO C., P. JACQUES et A. KALT (2000). Photodegradation of the amino azo benzene acid orange 52 by trace advanced oxidation processes UV/H₂O₂, UV/TiO₂, and VIS/TiO₂ comparative mechanistic and kinetic investigations. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 130, 35.
- CZERNICHOWSKI A. (1994). Gliding arc. Applications to engineering and environment control. *Pure Appl. Chem.*, 66, 1301-1310.
- DELAIR L. (2004). *Caractérisation de sources plasma dédiées à la simulation de rentrée atmosphérique et au traitement des polluants : arc soufflé basse pression et décharge glissante atmosphérique*. Thèse de Doctorat, Univ. Rouen, France, 56 p.
- DOUBLA A., E.B. TSAGOU-SOBZE, D. MOUSSA, R. BURLICA, E. HNATIUC et J.L. BRISSET (2007). Plasmachemical degradation of urea and thiourea solutes exposed to an electric discharge at atmospheric pressure. *Rev. Sci. Eau.*, 20, 265-272.
- GHEZZAR M.R., F. ABDELMALEK, M.N. BELHADJ, N. BENDERDOUCHE et A. ADDOU. (2007). Gliding arc plasma assisted photocatalytic degradation of anthraquinonic dye acid green 25 in solution with TiO₂. *Appl. Catal. B.*, 72, 304-313.
- GUIVARCH E., S. TREVIN et C. LAHITTE (2003). Degradation of azo dyes in water by Electro-Fenton process. *Environ Chem Lett.*, 1, 38 p.
- HONG J., N. TA, S. YANG, Y. LUI et C. SUN (2007). Microwave-assisted direct photolysis of bromophenol blue using electrodeless discharge lamps. *Desalination*, 214, 62-69.
- KOSSITSYN M., A. GUTSOL et A. FRIEDMAN (2003). Generation and diagnostic of non equilibrium plasma in gliding arc discharge. Dans : *Proc. 16th International Conference on phenomena in Ionized gases (ICPIG)*, Taormina, Italie, Po 4.6, p. 231.
- MALETZKY P. et R. BAUER (1998). The photo-Fenton method degradation of nitrogen containing organic compounds. *Chemosphere*, 37, 899.
- MOUSSA D., A. DOUBLA, G. KAMGANG-YOUBI et J.L. BRISSET (2007). Post discharge long life reactive intermediates involved in the plasma chemical degradation of an azoic dye. *IEEE Transac. Plasma Sci.*, 35, 444-453.
- OTURAN M.A., N. OTURAN, C. LAHITTE et S. TREVIN (2001). Production of hydroxyl radicals by electrochemically assisted Fenton's reagent. Application to the mineralization of an organic micropollutant, pentachlorophenol. *J. Electroanal. Chem.*, 507, 96-102.
- TANAKA K., K. PARDEMOLE et T. HISENAGA (2000). Photocatalytic degradation of commercial azo dyes. *Water Res.*, 34, 327.