

Désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène

Makuba Teddy SUNDA^{1*}, Kalulu Muzele TABA¹, Francis ROSILLON² et Bernard WATHELET³

¹ Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Département de Chimie, Laboratoire de Chimie Organique et d'Energétique, BP 190, Kinshasa XI, République Démocratique du Congo

² Université de Liège, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Unité Eau et Environnement, 185, avenue de Longwy, B-6700 Arlon, Belgique

³ Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Unité de Chimie et Biologie Industrielle, Passage des Déportés 2, B-5030 Gembloux, Belgique

* Correspondance, courriel : makubasunda@gmail.com

Résumé

Le présent article porte sur la désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène (MOP-5) fixé sur le polystyrène. Le méthoxy-5 psoralène a été fixé sur le polystyrène A par la réaction d'acylation de Friedel-Crafts. Le produit de la réaction analysé par la spectroscopie infrarouge montre une bande d'absorption du groupement carbonyle et celle du groupement hydroxyle (FT-IR, KBr, $-C=O$: 1729 cm^{-1} , $-OH$: 3416 cm^{-1}). La désinfection de l'eau par photosensibilisation avec ce produit montre l'inhibition complète des coliformes fécaux après 45 minutes. Malgré l'efficacité de ce produit, celui-ci reste dans l'eau après la désinfection. Le MOP-5 a été par la suite fixé sur un support qui permet de l'enlever après la désinfection, le polystyrène B. Le produit de la réaction MOP-5-P-B (solide en forme de film) montre une activité intéressante (inhibition complète des coliformes fécaux après six minutes et celle d'entérocoques fécaux après deux minutes). L'inhibition remarquée aussi bien pour les coliformes fécaux que les entérocoques fécaux est due à l'oxygène singulet (1O_2) généré par l'action combinée du produit MOP-5-P-B et de lumière. Ceci montre que ce nouveau système (MOP-5-P-B) est photosensibilisateur et peut être efficacement utilisé dans la désinfection photodynamique de l'eau.

Mots-clés : désinfection de l'eau, coliformes fécaux, entérocoques fécaux, photosensibilisation, méthoxy-5 psoralène, oxygène singulet.

Abstract

Water disinfection by photosensitization with 5-methoxypsoralen fixed on polystyrene

This article aims to disinfect water using 5-methoxypsoralen (MOP-5) fixed on polystyrene. MOP-5 is attached to polystyrene A by Friedel-Craft acylation reaction. The reaction product analyzed by infrared spectroscopy shows two characteristic bands : the carbonyl and hydroxyl bands (FT-IR, KBr, $-C=O$: 1729 cm^{-1} , $-OH$: 3416 cm^{-1}). Water disinfection by photosensitization with this product shows complete inhibition of fecal coliforms after 45 minutes. Despite its effectiveness, this product remains in water after disinfection. MOP-5 was subsequently fixed on a support allowing to remove it after disinfection, the polystyrene B. The

product of the reaction (MOP-5-P-B) shows an interesting activity (complete inhibition of fecal coliforms and fecal enterococci after six and two minutes respectively). The inhibition noted for both fecal coliforms and fecal enterococci is due to the singlet oxygen (1O_2) generated by the combined action of MOP-5-P-B and light. Therefore, this new system (MOP-5-P-B) is photosensitizer and can be effectively used in photodynamic water disinfection.

Keywords : *water disinfection, fecal coliforms, fecal enterococci, photosensitization, 5-methoxypsoralen, singlet oxygen.*

1. Introduction

Près de deux milliards de la population mondiale n'ont pas accès à l'eau potable [1]. Ceci doit être considéré comme l'un des sérieux problèmes de santé publique auxquels nous devons faire face. Selon les Nations Unies, il existe chaque année 1,7 milliard des cas de diarrhées attribuables à l'insalubrité de l'eau [2]. Ce problème peut être résolu par la promotion de traitement de l'eau au niveau familial ou individuel [3, 4]. L'approche au niveau individuel consiste à faire bouillir de l'eau ou à faire usage des produits chlorés [5]. Mais ces méthodes de désinfection de l'eau posent des problèmes. Bouillir de l'eau exige beaucoup d'énergie que le monde rural trouve dans le bois. Ce type de traitement n'est pas approprié car il peut conduire à la déforestation [6]. Les méthodes courantes de traitement de l'eau utilisent le chlore (Cl_2) et ses dérivés, l'ozone (O_3) et les lampes ultraviolettes. Le chlore, les dérivés chlorés et l'ozone sont souvent inaccessibles par les populations déshéritées. Les lampes ultraviolettes sont coûteuses [6, 7]. La désinfection de l'eau par la lumière solaire, une ancienne technique, simple, devrait en principe être une bonne alternative pour la désinfection de l'eau pour les populations des pays en voie de développement [8 - 11]. L'énergie solaire est universellement présente, durable aussi longtemps qu'il y aura la vie sur terre. La désinfection de l'eau par le soleil implique deux processus : la désinfection par radiation solaire et le traitement thermal par l'énergie solaire. Le meilleur résultat est obtenu pour de petite quantité d'eau de 1 à 2 L pour un temps d'exposition de 5 heures à une température de 50°C. Toutefois, l'efficacité de cette technique est souvent mise en doute à cause du manque d'indicateur d'exposition de l'eau au soleil et surtout des variations des conditions climatiques. Cette méthode peut être améliorée par l'usage de l'oxygène singulet généré par l'action combinée de lumière et d'un photosensibilisateur [12, 13].

Certaines plantes utilisées dans la pharmacopée traditionnelle pour soigner les infections microbiennes et parasitaires sont supposées réagir par un mécanisme de type stress oxydatif [6, 14, 15]. Ces plantes sont donc capables de générer l'oxygène singulet via la photosensibilisation. Lors de l'étude de la désinfection de l'eau par photosensibilisation avec les extraits de feuilles de plantes, Taba et al. [16] ont montré que les extraits aqueux de *Cassia alata*, *Cassia occidentalis* et *Carica papaya* avaient un effet photosensibilisateur. Cette observation a été confirmée quelques années plus tard par les travaux de Sunda et al. [17], lors de l'étude de la désinfection de l'eau par photosensibilisation avec les extraits de ces trois mêmes plantes, auxquels sont venus s'ajouter les extraits de feuilles de *Phyllanthus niruri* et *Coleus Kilimandschari*. Malheureusement, l'activité photosensibilisatrice remarquée dans ces plantes n'est significative que lorsque le milieu est saturé en oxygène (barbotage). Une nouvelle série de plantes, dont l'activité photosensibilisatrice est indépendante de la saturation du milieu en oxygène a été étudiée (*Citrus limonum*, *Citrus reticulata* et *Citrus bergamia*) [18]. Lors de cette étude, il a été remarqué une activité accrue de *Citrus bergamia* par rapport aux deux autres plantes. L'étude approfondie de la désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le *Citrus bergamia* a montré que la molécule responsable de son activité est le

méthoxy-5 psoralène, une coumarine photoactivable considérée comme un puissant agent photosensibilisateur [6]. La désinfection photodynamique de l'eau avec le méthoxy-5 psoralène a aussi montré une bonne activité de cette molécule [19]. Malgré l'activité remarquable pour cette molécule, celle-ci reste dans l'eau après la désinfection. Dans la présente étude, le méthoxy-5 psoralène a été fixé sur un support solide pour pouvoir l'enlever après la désinfection de l'eau. Le polystyrène a été choisi comme support. Deux sortes de polystyrène ont été utilisés (A et B).

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

2-1-1. Désinfection de l'eau avec le MOP-5 fixé sur le polystyrène A

2-1-1-1. L'eau à analyser

L'eau utilisée dans ce travail provient de la rivière Semois, en Belgique. Cette eau contient approximativement $25 \cdot 10^3$ UFC coliformes fécaux / 100 mL.

2-1-1-2. Méthoxy-5 psoralène (MOP-5)

Le méthoxy-5 psoralène utilisé dans ce travail provient de Sigma Aldrich, Belgique (Référence : 65320).

2-1-1-3. Polystyrène

Le polystyrène utilisé dans ce travail provient de Sigma Aldrich, Belgique (Référence : 12973). Ses caractéristiques sont les suivantes: Chlorure de benzoyle polystyrène, 100-300 mesh, charge : 1,5 mmol/g. Pour la suite du travail, ce polystyrène sera désigné polystyrène A.

2-1-2. Désinfection de l'eau avec le MOP-5 fixé sur le polystyrène B

2-1-2-1. Eau à analyser

Les échantillons d'eau proviennent de la rivière Semois en Belgique. Cette eau contient approximativement 10^4 et 10^3 UFC / 100 mL, respectivement pour les coliformes fécaux et entérocoques fécaux.

2-1-2-2. Méthoxy-5 psoralène (MOP-5)

Le méthoxy-5 psoralène provient de Sigma Aldrich, Belgique (Référence : 65320).

2-1-2-3. Polystyrène

Le polystyrène utilisé dans ce travail provient de Sigma Aldrich, Belgique (Polystyrene monocarboxy terminated $M_w \sim 200000$ by GPC) (Référence: 701645). Pour la suite des expériences, ce polystyrène sera désigné polystyrène B.

2-2. Méthodes

2-2-1. Désinfection de l'eau avec le MOP-5 fixé sur le polystyrène A

2-2-1-1. Fixation du méthoxy-5 psoralène sur le polystyrène A

Le méthoxy-5 psoralène a été fixé sur le polystyrène A par mélange des 3 solutions suivantes:

- Solution 1 : 35 mg du méthoxy-5 psoralène dans 3 mL de dichlorométhane ;
- Solution 2 : 250 mg du polystyrène dans 3 mL de dichlorométhane ;
- Solution 3 : 0,5 g de chlorure d'étain (SnCl_4) dans 2 mL de dichlorométhane.

Cette réaction a été réalisée sous agitation, pendant 48 heures, à la température ambiante [20]. Le produit de la réaction (3, voir **Figure 1**) a été filtré, puis lavé par le dichlorométhane. Par la suite, celui-ci a été soigneusement lavé plusieurs fois avec l'eau distillée, puis séché. Il se présente sous forme de poudre brune (FT-IR, KBr, $-\text{C}=\text{O}$: 1729 cm^{-1} , $-\text{OH}$: 3416 cm^{-1})

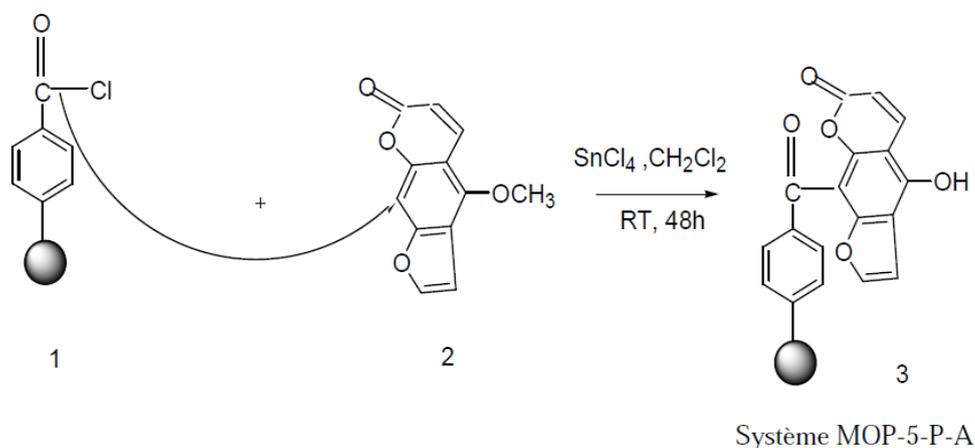


Figure 1 : Fixation du méthoxy-5 psoralène (2) sur le polystyrène A(1)

2-2-1-2. Tests de photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène A (MOP-5-P-A)

Dans deux erlenmeyers contenant 100 mL d'eau à analyser, on ajoute 20 mg du MOP-5-P-A fixé sur le polystyrène (1 et 2). Un troisième erlenmeyer contenant l'eau non traitée est utilisé comme témoin (3). Les échantillons 1 et 3 sont soumis à l'agitation (à l'aide d'un agitateur magnétique) et exposés à la lumière (lampe UV, marque B-100 AP, émettant entre 320 et 400 nm, avec un maximum à 365 nm). Cette lampe a été utilisée pour éviter les fluctuations de l'intensité lumineuse des rayons solaires. En outre, cette zone est contenue dans le spectre solaire qui touche la surface de la terre. La lampe a été positionnée à 25 cm des échantillons. L'échantillon 2 a été gardé à l'obscurité. Après 0, 15, 30, 60, 120 et 180 minutes, 1 mL d'eau provenant des tests de photosensibilisation a été prélevé dans chaque lot pour la mise en culture.

2-2-1-3. Analyses bactériologiques

Les milieux Rapid'Ecoli a été utilisé pour la culture des coliformes fécaux. Après 24 heures d'incubation à $44,5^\circ\text{C}$, les colonies ont été dénombrées les unes après les autres. Les différents points repris dans chaque figure représentent la moyenne de dix mesures. Pour chaque série de données l'erreur standard a été calculée (Moyenne \pm SD).

2-2-2. Désinfection de l'eau avec le MOP-5 fixé sur le polystyrène B

2-2-2-1. Fixation du méthoxy-5 psoralène sur le polystyrène B

Le méthoxy-5 psoralène a été fixé sur le polystyrène comme suit : Etant donné que la fonction acide carboxylique n'est pas très réactionnelle par rapport à la fonction chlorure d'acyle, celle-ci a été transformée en chlorure d'acyle avec le chlorure de thionyle comme suit : 170 mg de polystyrène (P-COOH) ont été mélangés avec 0,5 mL de chlorure de thionyle (SOCl_2) dans un ballon de 50 mL. Par la suite, quelques gouttes de diméthyle formamide (DMF) ont été ajoutées. Le mélange a par après été chauffé à reflux (82°C) pendant 48 heures. On obtient le produit (1). Par la suite, 2 mL d'acide trifluoroacétique (TFA) ont été mélangés avec le produit (1), puis 6 mg de MOP-5. Le mélange a été chauffé à reflux à 82°C , sous agitation, pendant deux heures [21]. Le produit (2) (Cristaux blancs, qui, au fil de la réaction, forment un solide en forme de film) a été plusieurs fois lavé avec l'eau distillée et séché avant d'être utilisé dans les tests de photosensibilisation

2-2-2-2. Tests de photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène B (MOP-5-P-B)

Dans deux erlenmeyers contenant 100 mL d'eau à analyser, on ajoute le système MOP-5-P-B (1 et 2). Un troisième erlenmeyer contenant l'eau non traitée est utilisé comme témoin (3). Les échantillons 1 et 3 sont exposés à la lumière (lampe UV, marque B-100 AP, émettant entre 320 et 400 nm, avec un maximum à 365 nm). La lampe a été positionnée à 25 cm des échantillons. L'échantillon 2 a été gardé à l'obscurité. Après 0, 2, 4, 6, 13, 15,30 et 60 minute(s), 1 mL d'eau provenant des tests de photosensibilisation a été prélevé dans chaque lot pour la mise en culture

2-2-2-3. Analyses bactériologiques

Les milieux Rapid'Ecoli et Bile esculine ont été utilisés pour la culture des coliformes et entérocoques fécaux respectivement. Après 24 heures d'incubation à $44,5^\circ\text{C}$, un comptage des colonies a été réalisé. Les différents points repris dans chaque figure représentent la moyenne de dix mesures. Pour chaque série de données l'erreur standard a été calculée (Moyenne \pm SD).

3. Résultats

3-1. Caractérisation du méthoxy-5 psoralène (MOP-5) fixé sur le polystyrène A

La **Figure 2** donne les résultats de la spectroscopie infrarouge du produit de la réaction entre le MOP-5 et le polystyrène A.

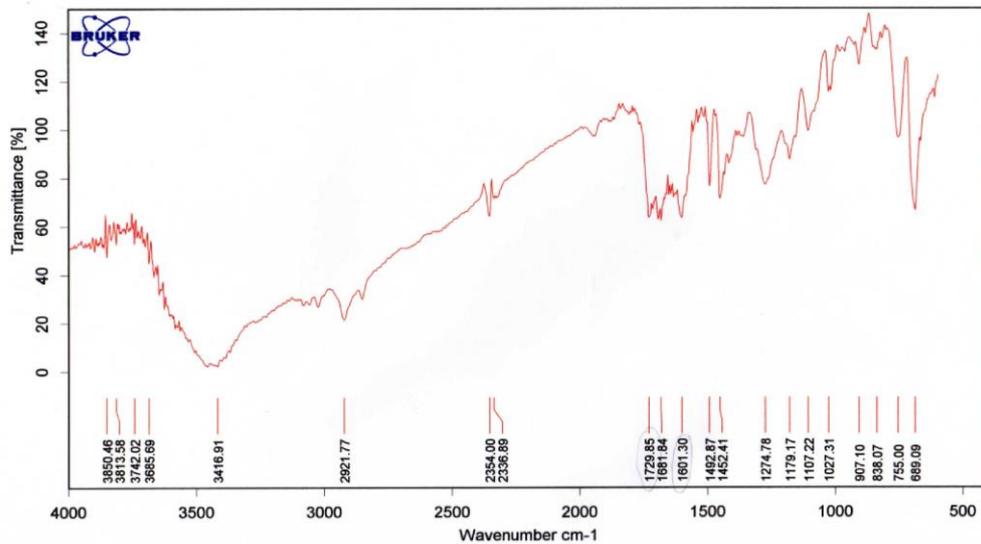


Figure 2 : Spectre infrarouge du méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène A

Après le dépouillement du spectre, nous avons remarqué la présence d'une large bande à 3416 cm^{-1} , caractéristique du groupement -OH. Nous avons en outre remarqué une absorption à 1729 cm^{-1} , caractéristique du groupement carbonyle ($\text{-C}=\text{O}$) du méthoxy-5 psoralène. Celle-ci met en évidence la fixation du MOP-5 sur le polystyrène.

3-2. Tests de désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène A (MOP-5-P-A)

La **Figure 3** donne les résultats des tests de désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène A.

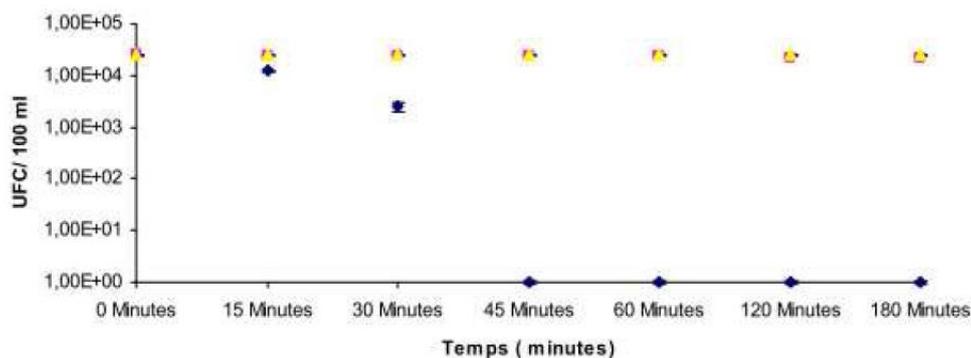


Figure 3 : Inhibition des coliformes fécaux en fonction du temps dans l'eau traitée avec le MOP-5-P-A

- (▲) : Eau traitée et gardée à l'obscurité
- (■) : Eau non traitée et exposée à la lumière
- (◆) : Eau traitée et exposée à la lumière

Ces résultats montrent une très bonne activité du méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène A (MOP-5-P-A) dans la désinfection de l'eau par photosensibilisation (Inhibition complète des coliformes fécaux après 45 minutes d'exposition). Quant à l'échantillon d'eau non traité et exposé à la lumière, aucune

inhibition significative n'a été constatée. Ceci laisse supposer que le méthoxy-5 psoralène garde ses propriétés photosensibilisatrices après fixation sur le polystyrène A. Nous avons en outre remarqué une activité accrue du méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène par rapport au méthoxy-5 psoralène en solution [19]. Ceci indique que la fixation du méthoxy-5 psoralène sur le polystyrène A augmente l'activité photosensibilisatrice de cette molécule. La récupération du système MOP-5-P-A après la désinfection se fait difficilement, car celui-ci se présente sous forme de poudre. Il faut donc procéder par la décantation. Ceci prend du temps et semble être moins pratique. Afin de résoudre ce problème, nous avons fixé le MOP-5 sur un support qui permet de l'enlever facilement après la désinfection, le polystyrène B.

3-3. Désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène B (MOP-5-P-B)

3-3-1. Sensibilité des coliformes fécaux vis-à-vis de méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène B (MOP-5-P-B)

Les résultats des tests de désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène B sont repris dans la **Figure 4**.

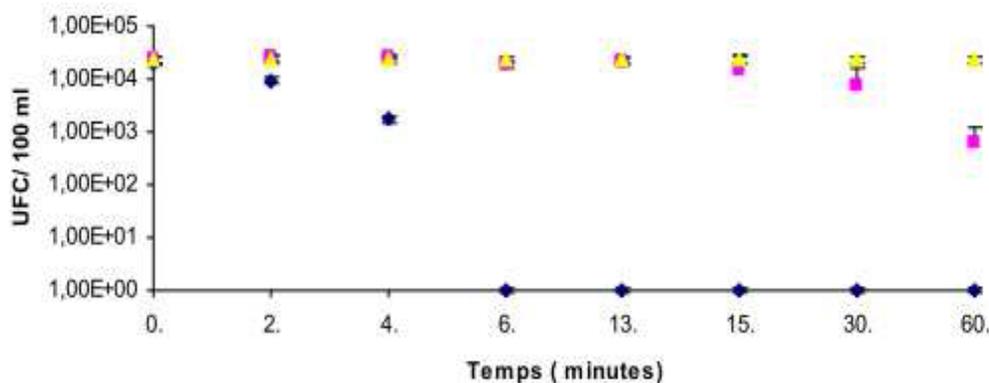


Figure 4 : Inhibition des coliformes fécaux en fonction du temps dans l'eau traitée avec le Méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène-B

- (▲) : Eau traitée et gardée à l'obscurité
- (■) : Eau non traitée et exposée à la lumière
- (◆) : Eau traitée et exposée à la lumière

Ces résultats montrent une inhibition complète des coliformes fécaux après six minutes d'exposition. Aucune inhibition n'a été constatée dans l'eau traitée et gardée à l'obscurité. Un abattement négligeable a été constaté dans l'eau non traitée et exposée. Ceci montre que le système MOP-5-P-B est photosensibilisateur et que le méthoxy-5 psoralène garde ses propriétés photosensibilisatrices après fixation sur le polystyrène.

3-3-2. Sensibilité des entérocoques fécaux vis-à-vis de méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène B (MOP-5-P-B)

Les résultats des tests de désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène B (MOP-5-P-B) sont repris dans la **Figure 5**.

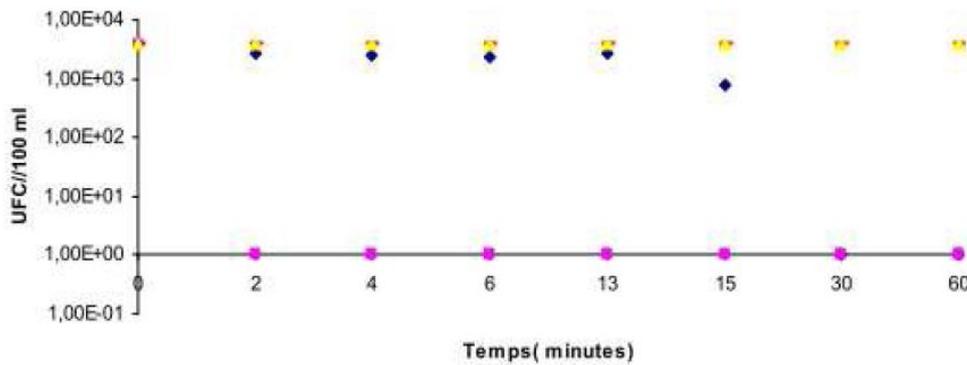


Figure 5 : Inhibition d'entérocoques fécaux en fonction du temps dans l'eau traitée avec le Méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène B

- (▲) : Eau non traitée et gardée à l'obscurité
- (■) : Eau traitée et exposée à la lumière
- (◆) : Eau non traitée et exposée à la lumière

Ces résultats montrent une inhibition complète d'entérocoques fécaux présents dans l'eau après deux minutes d'exposition à la lumière. Aucune inhibition n'a été notée dans l'eau traitée avec le MOP-5-P-B et gardée à l'obscurité. Ceci laisse supposer que le système MOP-5-P-B, en présence de lumière, initie une photoréaction qui serait responsable de l'inhibition d'entérocoques fécaux.

4. Discussion

Le spectre infrarouge du produit de la réaction entre le méthoxy-5 psoralène et le polystyrène A permet de mettre en évidence une absorption à 3416 cm^{-1} (Figure 2). Celle-ci est la signature d'un groupement -OH provenant du clivage du groupement $-\text{OCH}_3$. Nous avons en outre remarqué une absorption à 1729 cm^{-1} . Celle-ci est caractéristique du groupement carbonyle ($-\text{C}=\text{O}$) du méthoxy-5 psoralène. Cette absorption met en évidence la fixation du méthoxy-5 psoralène sur le polystyrène. Les valeurs obtenues lors de la désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène A (MOP-5-P-A) montrent une très bonne activité. Cette activité est mise en évidence par l'inhibition complète des coliformes fécaux après 45 minutes d'exposition, contrairement à l'échantillon d'eau non traité et exposé, où aucune inhibition significative n'a été constatée du début à la fin des expériences (Figure 3). Ceci montre que le méthoxy-5 psoralène garde ses propriétés photosensibilisatrices après la fixation sur le polystyrène. Nous avons en outre remarqué une activité accrue du méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène A par rapport au méthoxy-5 psoralène en solution [19]. Ceci se justifie par l'apport du groupement chromophore ($-\text{C}=\text{O}$) apporté par le polystyrène au méthoxy-5 psoralène. Pour ce qui est du méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène B (MOP-5-P-B), il a été remarqué une inhibition complète des coliformes fécaux après six minutes d'exposition à la lumière (Figure 4). Aucune inhibition des coliformes fécaux n'a été constatée dans l'eau traitée avec le système MOP-5-P-B et gardée à l'obscurité. En ce qui concerne l'eau non traitée et exposée, il a été noté un abattement négligeable pour la même durée d'exposition à la lumière. Ceci permet de mettre en évidence l'activité photodynamique du système MOP-5-P-B. En comparant ces résultats à ceux obtenus avec la forme libre de MOP-5 [19], nous constatons une activité accrue du méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène-B (MOP-5-P-B). Ceci pourrait se justifier :

- ✓ premièrement, par le fait que l'eau traitée avec la forme libre présente une turbidité très élevée (dispersion des particules du méthoxy-5 psoralène dans l'eau) que celle traitée avec le système MOP-5-P-B (solide en forme de film). Cette turbidité ne permet pas une bonne transmission de lumière. Par contre, pour l'eau traitée avec le système MOP-5-P-B, la bonne transmission de lumière facilite l'excitation du méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène. Etant dans sa forme excitée, celui-ci transmet l'énergie emmagasinée à l'oxygène triplet (3O_2). Ce dernier passe dès lors de l'état triplet à l'état singulet (1O_2) et initie la réaction de l'inhibition des microorganismes présents dans le milieu [22 - 26]. Ceci pourrait être aussi à la base de l'activité élevée remarquée pour le système MOP-5-P-B par rapport au système MOP-5-P-A (poudre).
- ✓ Deuxièmement, cette différence pourrait être due au groupement chromophore ($-C = O$) apporté par le polystyrène au méthoxy-5 psoralène. Celui-ci facilite la résonance tout en augmentant la sensibilité de cette molécule vis-à-vis de lumière et donc le rendement quantique de formation de l'oxygène singulet (1O_2).

Il a été en outre remarqué une inhibition complète d'entérocoques fécaux après deux minutes d'exposition à la lumière (**Figure 5**). Ceci montre que les entérocoques fécaux (Gram+) sont plus sensibles à la désinfection par photosensibilisation que les coliformes fécaux (Gram-). Cette différence de sensibilité pourrait s'expliquer par des différences au niveau de la constitution de leurs membranes cellulaires. En effet, la membrane cellulaire des bactéries Gram- présente une couche de lipopolysaccharides qui joue le rôle de barrière contre l'oxygène singulet. De plus, cette couche est constituée d'acides gras insaturés et de protéines, qui constituent à leur tour un piège pour l'oxygène singulet. La membrane des bactéries Gram+, dépourvue de cette couche, est facilement détruite par l'oxygène singulet. Après la destruction de la membrane, l'oxygène singulet pénètre dans la cellule et attaque les constituants cellulaires. Cela conduit à la mort cellulaire. Bien que résistante, la membrane cellulaire des bactéries Gram- finit toujours par être détruite par l'oxygène singulet. Il s'ensuit une mort certaine de la cellule bactérienne. Ces résultats sont en accord avec ceux mentionnés par plusieurs auteurs. En effet, lors de l'étude de l'activité photodynamique du colorant curcumin vis-à-vis des bactéries Gram- et Gram+, Dahl et *al.* [27] ont remarqué que les bactéries (Gram+) étaient moins résistantes par rapport aux bactéries Gram-. Etudiant le pouvoir oxydant de l'oxygène singulet vis-à-vis des bactéries Gram- et Gram+, Dahl et *al.* [28] ont constaté que les bactéries Gram- sont plus résistantes que les bactéries Gram+.

5. Conclusion

Cette étude a porté sur la désinfection de l'eau par photosensibilisation avec le méthoxy-5 psoralène fixé sur le polystyrène. Le méthoxy-5 psoralène a été fixé dans un premier temps sur le polystyrène A. Le produit de la réaction (poudre) montre une bande caractéristique du groupement carbonyle et celle du groupement hydroxyle (FT-IR, KBr, $-C = O : 1729 \text{ cm}^{-1}$, $-OH : 3416 \text{ cm}^{-1}$). La désinfection de l'eau par photosensibilisation avec ce produit montre une inhibition complète des coliformes fécaux après 45 minutes d'exposition. Malgré l'efficacité remarquée pour ce produit, celui-ci reste dans l'eau après la désinfection. Par la suite, le méthoxy-5 psoralène a été fixé sur le polystyrène B. Le produit de la réaction entre le méthoxy-5 psoralène et le polystyrène B (solide en forme de film) montre une inhibition complète des coliformes fécaux après six (6) minutes. Les entérocoques fécaux sont complètement inhibés après deux (2) minutes d'exposition. L'inhibition remarquée aussi bien pour les coliformes que les entérocoques fécaux est due à l'oxygène singulet généré dans le milieu. Les études supplémentaires s'avèrent nécessaires, notamment en ce qui concerne la sensibilité des parasites et virus vis-à-vis de ce produit.

Références

- [1] - WHO/UNICEF, "Progress for Water supply, Sanitation and hygiene", *Joint Monitoring Program*, ISBN: 978-92-4 15-1623-5 (2019)
- [2] - WHO/UNICEF, "Progress on Drinking Water and Sanitation", *Joint Monitoring Program*; ISBN: 978-92-415-0724-0 (2014)
- [3] - M. PREEZ, K. MCGUIGAN, R. CONROY, *Environ. Sci. Technol.*, 44 (2010) 8744 - 8749
- [4] - M. B. KEOGH, M. CASTRO-ALFEREZ, M. I. POLO-LOPEZ, I. CALDERERO, Y. A. AL-ERYANI, C. TITUS, B. SAWANT, R. DHODAPKAR, C. MATHUR, K. G. MCGUIGAN, P. IBANEZ, *Solar Energy*, 116 (2015) 1 - 11
- [5] - S. DEJUNG, I. FUENTES, G. ALMANZA, R. JARRO, L. NAVARRO, G. ARIAS, E. URQUIETA, A. TORRICO, W. FENANDEZ, M. IRIARTE, C. BIRRER, W. A. STAHEL and M. WEGELIN, *Journal of Water Supply : Research and Technology-AQUA*, 56(4) (2007) 245 - 256
- [6] - M. SUNDA, K. M. TABA, F. ROSILLON ET B. WATHELET, *C. R. Chimie*, 19 (2016) 827 - 831
- [7] - S. MALATO, P. IBANEZ, M. I. MALDONADO, J. BLANCO and W. GERNJAK, *Catalysis Today*, 147 (1) (2009) 1 - 59
- [8] - E. JASWA, P. F. IBANEZ, C. NAVNTOFT, M. LÓPEZ, K. MCGUIGAN, *J.Chem.Technol. Biotechnol.* , 85 (2010) 1028 - 1037
- [9] - J. CHUECA, M. I. LOPEZ, R. MOSTEO, M. P. ORMAD, P. IBANEZ, *Appl. Catal. B: Environ.* , 150 (2014) 619 - 629
- [10] - W. HEASELGRAVE and S. KILVINGTON, *Acta. Trop.*, 119 (2011) 138 - 143
- [11] - P. R. HUNTER, J. BARTRAM, S. CAIRCROSS, *Environ. Sci. Technol.* , 46 (2012) 3035
- [12] - G. FRESNADILLO, *ChemPhotoChem*, 2 (2018) 512 - 534
- [13] - Y. WU, Y. ZHEN, Y. MA, R. ZHENG, Z. WANG and H. FU, *J. Phys. Chem. Lett.*, 1(2010) 2499 - 2502
- [14] - W. Bors, M. Saran, D. Tait, "Oxygen radicals in chemistry and biology", De Gruyter, Berlin (1984) 341 - 344
- [15] - I. A. Clark, W. B. Cowden, "Antimalarias in oxidation stress", Academic Press, London (1984) 187 - 201
- [16] - K. M. TABA, E. LUWENGA, *Med. Fac. Landbouww.*, Univ. Gent., 64 (1) (1999) 183 - 188
- [17] - M. SUNDA, F. ROSILLON and K. M. TABA, *Eur. J. Water Qual.*, 39 (2) (2008) 199 - 209
- [18] - M. SUNDA, F. ROSILLON, K. M. TABA et N. LAMI, "Désinfection de l'eau par photosensibilisation avec les huiles essentielles de Citrus bergamia, Citrus reticulata et Citrus limonum", in: 8^{ème} Congrès international Gruttee (2009)
- [19] - M. SUNDA, K. M. TABA, F. ROSILLON AND B. WATHELET, *Int. J. Innov. and Appl.Study*, 25(3) (2019) 843 - 850
- [20] - M. SMITH "Organic Synthesis", 3rd Edition, Academic Press (2011)
- [21] - L. WOODS and L. HAROLD, *Kansas. Acad. Sci.*, 63(3) (1960) 165 - 168
- [22] - M. FOSZPA, K. BEDNARCZYK, E. DROZDEK, R. C. MARTINS, S. LEDAKOWICZ, M. GMUREK, *Water Air Soil Pollut.*, 229 (2018) 362
- [23] - S. B. SOMANI, N. W. INGOLE, *IJAERS*, 1 (2011) 47 - 50
- [24] - E. ALVES, J. RODRIGUES, M. FAUSTINO, M. NEVES, J. CAVALEIRO, Z. LIN, A. CUNHA, M. H. NADAIS, J. TOM, A. ALMEIDA, *Dyes and Pigments*, 110 (2014) 80 - 88
- [25] - A. VALKOV, K. ADAR RAIK, Y.SINAI, F. NAKONECHNY and M. NISNEVITCH, *Water*, 11(1) (2019)
- [26] - C. R. CAMARGO, V. MARTINS, A. PLEPIS and J. PERUSSI, *Glo J. of Sc. Fro. Res.*, 17(2)(2017) 5 - 12
- [27] - T. A. DAHL, M. C. GOWAN, M. SHAND, V. SRINIVASAN, *Arch. Microbiol.*, 151 (2) (1989) 183 - 185
- [28] - T. A. DAHL, W. MIDDEN, P. HARTMAN, *J. Bacteriol.*, 171 (4) (1989) 2188 - 2194