



Inactivation photocatalytique de *Escherichia coli* par une suspension de TiO₂ sous irradiation UV-C à 254 nm

" Photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* by a TiO₂ suspension under UV-C irradiation at 254 nm "

Fifi Mulangala Muderhwa^{1*}, Antoine Kimpanza Mbongo¹, Prince Bulola Iyambe², Pascal Maziana Disadisa¹, Denis Bilasi Musengele^{1,3}, Trésor Ndonganzadi^{1,3}, Joseph K'Ekuboni Malongwe¹, Jérémie Lunguya Muswema¹, Omer Muamba Mvele¹ & Gracien Bakambo Ekoko¹

¹Département de Chimie et Industries, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo.

²Université Médicale de Vienne, Ecole de Santé Publique, Spilalgasse 23, 1090, Vienne, Autriche.
³Département de Chimie-Physique, Institut Supérieur Pédagogique de Kikwit, République Démocratique du Congo.

Résumé

Dans un contexte marqué par la raréfaction de l'eau potable et l'augmentation de la contamination microbienne, cette étude explore l'utilisation de la photocatalyse hétérogène comme procédé d'oxydation avancée pour la désinfection de l'eau. Le procédé étudié repose sur le couplage d'un rayonnement ultraviolet (UV) et d'un photocatalyseur à base de dioxyde de titane (TiO₂, Degussa P25) utilisé sous forme de poudre dans un réacteur photocatalytique. L'efficacité du système a été évaluée pour l'inactivation de la bactérie pathogène *Escherichia coli*, couramment utilisée comme indicateur de contamination fécale des eaux. Les résultats expérimentaux montrent que le TiO₂ seul, en absence d'irradiation UV, présente une activité bactéricide très faible. En revanche, l'irradiation UV à 254 nm entraîne une inactivation progressive des bactéries par photolyse. Le couplage UV/TiO₂ produit un effet synergique significatif conduisant à une inactivation rapide et complète de *Escherichia coli*, avec une concentration optimale du catalyseur estimée à 0,8 g/L. Ce phénomène est principalement attribué à la formation de radicaux hydroxyles hautement réactifs, responsables de la dégradation des membranes cellulaires et de l'ADN bactérien. Cette approche apparaît ainsi comme une technologie prometteuse pour le traitement et la désinfection de l'eau, notamment dans les régions confrontées à un accès limité à l'eau potable.

Mots-clés : photocatalyse hétérogène ; TiO₂ ; *Escherichia coli* ; désinfection de l'eau ; rayonnement UV.

Abstract

In a context of increasing scarcity of drinking water and growing microbial contamination, this study investigates the use of heterogeneous photocatalysis as an advanced oxidation process for water disinfection. The process involves the coupling of ultraviolet (UV) irradiation with a titanium dioxide (TiO₂, Degussa P25) powder photocatalyst in a photocatalytic reactor. The efficiency of the system was evaluated for the inactivation of the pathogenic bacterium *Escherichia coli*, commonly used as an indicator of fecal contamination in water. Experimental results showed that TiO₂ alone, in the absence of UV irradiation, exhibited very limited bactericidal activity. In contrast, UV irradiation at 254 nm induced a progressive bacterial inactivation through photolysis. The combined UV/TiO₂ system produced a strong synergistic effect, leading to rapid and complete inactivation of *Escherichia coli*, with an optimal catalyst concentration of 0.8 g/L. This inactivation is mainly attributed to the generation of highly reactive hydroxyl radicals responsible for the degradation of bacterial cell membranes and DNA. This approach therefore represents a promising technology for water treatment and disinfection, particularly in regions facing limited access to safe drinking water.

Keywords: heterogeneous photocatalysis; titanium dioxide; *Escherichia coli*; water disinfection; ultraviolet irradiation.

* Auteur correspondante : Fifi Mulangala Muderhwa, (fyfymuder@gmail.com), Tél. : +243 892711468

<https://orcid.org/0009-0009-8795-9604>; Reçu le 20/02/2026 ; Révisé le 15/03/2026 ; Accepté le 08/04/2026

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i2.258>

Copyright: ©2026 Muderhwa et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-NC-SA 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

L'accès à l'eau potable constitue l'un des enjeux majeurs du développement durable et de la santé publique à l'échelle mondiale. La croissance démographique, l'urbanisation et l'augmentation des activités industrielles et agricoles exercent une pression croissante sur les ressources hydriques, tandis que la dégradation de la qualité de l'eau accentue les risques sanitaires. Selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017) et l'UNICEF (2018), plusieurs régions du monde connaissent déjà une demande en eau dépassant la capacité de renouvellement des ressources disponibles. Parmi les principaux problèmes de qualité de l'eau figure la contamination microbiologique. La présence de bactéries d'origine fécale, notamment *Escherichia coli*, constitue un indicateur reconnu de pollution et peut être associée à divers troubles gastro-intestinaux (Roche, 2000). Dans ce contexte, la mise en œuvre de procédés efficaces de désinfection de l'eau demeure une priorité pour la protection de la santé publique.

Les méthodes conventionnelles de désinfection, telles que la chloration, sont largement utilisées dans les systèmes de traitement de l'eau. Toutefois, ces procédés présentent certaines limites, notamment la formation de sous-produits de désinfection potentiellement toxiques et une efficacité dépendant fortement des caractéristiques physico-chimiques de l'eau traitée (Ocampo et al., 2022). D'autres technologies, telles que l'ozonation et l'irradiation ultraviolette (UV), ont été développées comme alternatives. Néanmoins, l'ozonation peut générer des sous-produits indésirables et nécessite des installations coûteuses, tandis que l'efficacité de l'irradiation UV peut être réduite par la turbidité de l'eau ou la présence de matières en suspension limitant la pénétration du rayonnement lumineux (Gumy et al., 2006 ; Gumy et al., 2007 ; Rincón & Pulgarin, 2004).

Face à ces contraintes, les procédés d'oxydation avancée (POA) suscitent un intérêt croissant dans le domaine du traitement de l'eau. Ces procédés reposent sur la génération d'espèces oxydantes très réactives, notamment les radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$), capables d'oxyder les polluants organiques et d'inactiver les microorganismes pathogènes (Hodaifa et al., 2023). Parmi ces technologies, la photocatalyse hétérogène basée sur le dioxyde de titane (TiO_2) activé par irradiation UV apparaît comme une approche

particulièrement prometteuse. Le TiO_2 présente en effet plusieurs avantages, tels que sa stabilité chimique, sa faible toxicité, son coût relativement faible et sa forte activité photocatalytique. Sous irradiation lumineuse, il génère des paires électron-trou conduisant à la formation d'espèces réactives de l'oxygène capables d'endommager les membranes cellulaires et l'ADN des microorganismes (He et al., 2021 ; Rokicka-Konieczna & Morawski, 2024). Plusieurs études ont ainsi démontré l'efficacité des systèmes photocatalytiques TiO_2/UV pour la désinfection de l'eau et l'inactivation bactérienne (Horváth et al., 2022 ; Photolysis and TiO_2 Photocatalytic Treatment under UVC/VUV, 2019).

Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer l'efficacité du système photocatalytique UV/ TiO_2 pour l'inactivation de *Escherichia coli* dans l'eau. L'hypothèse principale est que l'irradiation UV en présence de TiO_2 en suspension génère des radicaux hydroxyles capables d'entraîner une inactivation bactérienne plus rapide et plus efficace que l'irradiation UV seule. L'étude examine également les effets de ce procédé sur l'intégrité cellulaire, notamment à travers la libération d'ions intracellulaires tels que K^+ et NH_4^+ , indicateurs de l'altération de la membrane bactérienne.

2. Matériel et méthodes

2.1 Matériels

2.1.1 Produits chimiques

Le dioxyde de titane (TiO_2) utilisé est un produit commercial de la société allemande Evonik-Degussa, référence P25. Il présente une composition cristallographique mixte avec 80 % d'anatase et 20 % de rutil, un diamètre moyen de 32 nm et une surface spécifique de $50 \pm 15 \text{ m}^2/\text{g}$, propriétés adaptées aux applications photocatalytiques (Dunnill & Parkin, 2012 ; Zhang et al., 2014 ; Muderhwa et al., 2020).

2.1.2 Matériels biologiques

Les souches bactériennes d'*Escherichia coli* E. coli ATCC 25 922 (Gram-) et les milieux de culture ont été fournis par Microbiologics (France), accréditée ATCC (Muderhwa et al., 2020).

2.2 Méthodes

2.2.1 Caractérisation du photocatalyseur TiO_2 (Degussa P25)

Tous les produits chimiques étaient de pureté analytique.

La structure cristallographique a été déterminée par diffraction des rayons X (XRD, D/MAX-2550) avec rayonnement Cu-K α ($\lambda = 1,54056$

Å). La taille des particules a été estimée par la formule de Debye-Scherrer (Zhang et al., 2014).

- La morphologie a été étudiée par microscopie électronique à balayage à émission de champ (FE-SEM, JEOL JSM-6700F) couplée à un spectromètre EDX.

- Les pesées ont été réalisées avec une balance analytique Scaltel ($\pm 0,0001$ g).

- La séparation des particules post-réaction s'est faite par filtration sur filtre seringue 0,45 μm .

- La quantification ionique après irradiation a été effectuée par spectrophotométrie UV-Vis (Thermospectronic 20 D+), en appliquant la loi de Lambert-Beer et des courbes d'étalonnage spécifiques (Muderhwa et al., 2020).

2.2.2 Préparation des milieux de culture pour la croissance d'*E. coli*

Trois milieux ont été préparés : Luria Bertani Agar (LB-A), Luria Broth (LB) et Phosphate Buffered Saline (PBS). Ils ont été stérilisés à 121°C pendant 20 min à l'autoclave. Le LB-A a été coulé dans des boîtes de Pétri stériles (40 g/L) et laissé à température ambiante pour gélification. Les autres milieux ont été conservés au réfrigérateur jusqu'à utilisation (ISO 11133:2014 ; Muderhwa et al., 2020).

2.2.3 Culture bactérienne

Une colonie d'*E. coli* a été inoculée dans du LB liquide et incubée à 37°C pendant 20 h avec agitation. La culture a été centrifugée, lavée avec une solution saline (NaCl 0,9 %) et resuspendue dans du PBS pour obtenir une concentration finale de 10⁹ CFU/mL, utilisée pour les essais photocatalytiques (Muderhwa et al., 2020 ; Madigan et al., 2021).

2.2.4 Montage du photoréacteur d'inactivation bactérienne

Le système expérimental comprenait un photoréacteur cubique à double paroi en PVC :

- Agitateur magnétique au fond de la cuve
- Huit lampes UV à vapeur de mercure (TS-UVC6W, $\lambda = 254$ nm, Beijing Institute of Electric Light Source),
- Caisse en bois réfléchissante garnie d'aluminium pour limiter les pertes lumineuses,
- Trous de ventilation pour refroidissement et aération.

Les lampes étaient espacées de 6 cm pour assurer une distribution homogène du rayonnement UV (Ekoko Bakambo et al., 2019 ; Muderhwa et al., 2020).

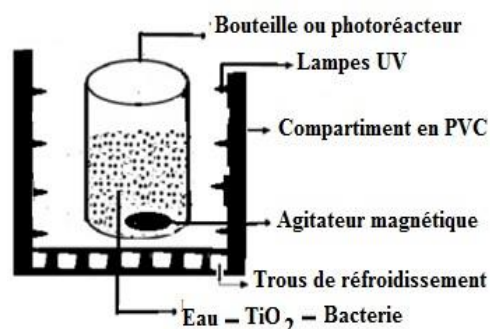


Figure 1 : Schéma du photoréacteur multi-lampes utilisé pour l'inactivation des bactéries d'*E. coli*.

2.2.5 Protocole expérimental d'inactivation bactérienne

Chaque photoréacteur (300 mL) a été rempli d'eau distillée contenant 2,7 g de NaCl (0,9 %) et une quantité définie de TiO₂. Avant inoculation, un prélèvement a été réalisé pour vérifier l'absence de contamination. Ensuite, 300 μL de la suspension bactérienne (10⁹ CFU/mL) ont été ajoutés, obtenant une concentration initiale d'environ 10⁶ CFU/mL. Le mélange a été homogénéisé avec un agitateur magnétique afin d'assurer une oxygénation optimale pour la photocatalyse sous UV (Ekoko et al., 2019 ; Muderhwa et al., 2020).

Ce protocole a retenu quatre témoins expérimentaux, à savoir :

- à l'obscurité sans TiO₂ ;
- à l'obscurité avec TiO₂ ;
- sous irradiation UV sans TiO₂ ;
- Sous irradiation UV avec TiO₂.

Tableau I. Témoins expérimentaux utilisés

Souche	Témoin 1	Témoin 2	Témoin 3	Témoin 4
<i>E. coli</i> ATCC 25 922 (Gram-)	Obscurité sans TiO ₂	Obscurité avec TiO ₂	Irradiation UV sans TiO ₂	Irradiation UV avec TiO ₂

2.2.6 Dénombrement bactériologique

La quantification des bactéries viables a été réalisée par ensemencement après dilutions décimales. Un volume de 1 mL a été transféré sur LB-A et incubé à 37°C pendant 20 h. La limite de détection était de 10 CFU/mL. Le nombre de colonies (N) a été calculé par :

$$N = \frac{\sum C}{V(n_1 + 0,1 n_2 T)} \quad (1)$$

Avec ΣC : somme des colonies comptées sur toutes les boîtes retenues

n_1 : nombre de boîtes retenues à la première dilution

n_2 : nombre de boîtes retenues à la deuxième dilution

V : volume de l'inoculum appliqué à chaque boîte (mL)

T : taux de dilution correspondant à la première dilution retenue

La validité et l'interprétation des résultats sont basés par le calcul d'un intervalle de confiance caractérisant la répartition statistique des microorganismes dans l'échantillon soumis au dénombrement des bactéries viables et cultivables. Avec une probabilité de 95%, l'intervalle de confiance Δ caractérisant cette dispersion microbienne est déterminé avec l'équation suivante :

$$\sigma = \left[\frac{\Sigma C}{\Delta} + \frac{1,92}{\Delta} \pm \frac{1,796 \sqrt{\Sigma C}}{\Delta} \right] \frac{1}{T} \quad (2)$$

L'intervalle de confiance Δ (95 %) a été déterminé par :

$$\Delta = V (n_1 + 0,1n_2) \quad (3)$$

3. Résultats

3.1 Caractérisation de la poudre « Degussa P25 »

3.1.1 Diffraction des Rayon X (DRX)

La structure et l'identification de phase de l'oxyde de titane ont été révélées à l'aide d'un diffractomètre modèle D/MAX-2550 à rayons X (rayonnement Cu-K α de $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) avec un filtre en nickel (Rigaku Co., Japon) servant d'anti cathode.

La nature cristalline de la poudre Degussa P25 a été mise en évidence par diffraction des rayons X (DRX). Le spectre obtenu (figure 3.1) montre des pics de diffraction assez larges à mi-hauteur, suggérant que les cristallites de l'oxyde de titane (TiO₂) sont de taille nanométrique.

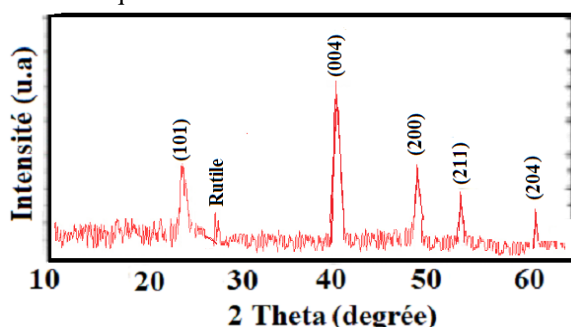


Figure 2 : Spectre de diffraction de rayon X de la poudre de « Degussa P25 ». Les différents pics de Bragg sont indexés par les indices de Miller correspondant.

En comparant les positions des raies observées avec celles des bases de données standards en diffraction des rayons X (ICDD : International Centre for Diffraction Data et l'une des bases de données les plus complètes pour la diffraction de poudres est le Powder Diffraction File (PDF)), on identifie deux phases cristallines majeures : l'anatase et le rutile, toutes deux dans une symétrie tétragonale mais avec des empilements structuraux distincts. La quantification relative indique la présence d'environ 83 % d'anatase et 17 % de rutile dans l'échantillon analysé. Ce ratio est très proche des proportions communément rapportées pour la poudre P25, souvent autour de 80 % anatase / 20 % rutile (par exemple, Dilaver et al., 2020) ; d'autres auteurs mentionnent même 85 % d'anatase et 15 % de rutile (Yu et al., 2009).

Ces résultats confirment que la poudre est bien cristallisée et présente une structure biphasée bien définie, ce qui est cohérent avec la littérature sur les propriétés photocatalytiques de P25 (Yu et al., 2009; référence à travailler selon le contexte).

3.1.2 Microscopie électronique à balayage de la surface (MEB) et à transmission (MET) de TiO₂

La morphologie et la taille des particules constituant la poudre ont été déterminées par microscopie électronique à transmission (MET ; Hitachi H-800), et les micrographies ont été prises avec une tension d'accélération de 200 kV avec des échantillons déposés sur une grille de cuivre recouverte de carbone.

La morphologie de surface, la taille des particules et les compositions élémentaires des électrodes de TiO₂ ont été déterminées par microscopie électronique à balayage à émission de champ (FE-SEM ; JEOL JSM-6700F) bien équipée d'un spectrophotomètre à rayons X à dispersion d'énergie (EDAX) et fonctionnant à 20 kV.

L'observation par microscopie électronique à balayage (MEB, figure 2a) révèle que les particules de TiO₂ possèdent une morphologie microporeuse ou multiporeuse. Les pores pourraient jouer un rôle de « centre de confinement » facilitant l'adsorption ou la capture des bactéries, ce qui favoriserait leur inactivation.

Par ailleurs, l'imagerie par microscopie électronique à transmission (MET, figure 2b) permet d'estimer la taille des cristallites sphériques : la moyenne se situe autour de 45 nm. On constate

également que les grains sont bien cristallisés et dispersés, sans agrégats massifs visibles.

Ces observations concordent avec des études antérieures sur la morphologie et la cristallinité de TiO₂ nanométrique, où une bonne dispersion et une porosité favorable sont des atouts pour les applications photocatalytiques.

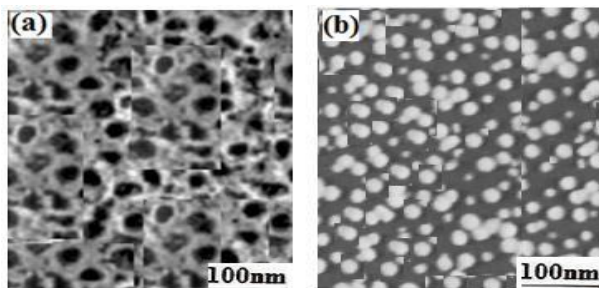


Figure 3 : (a) Photographie par microscopie électronique de balayage de la surface de la de TiO₂ utilisé ; (b) Image de la microscopie électronique à transmission de TiO₂.

3.1.3 Analyse FTIR de la poudre de TiO₂

Un spectrophotomètre infrarouge à transformée de Fourier (SHIMADZU) utilisant la technique des pastilles de KBr dans la gamme de 4000 à 400 cm⁻¹ a été utilisé pour enregistrer les bandes d'absorptions caractérisant des liaisons chimiques. Le spectre FT-IR de la poudre TiO₂ utilisée, est présenté sur la **figure 3**.

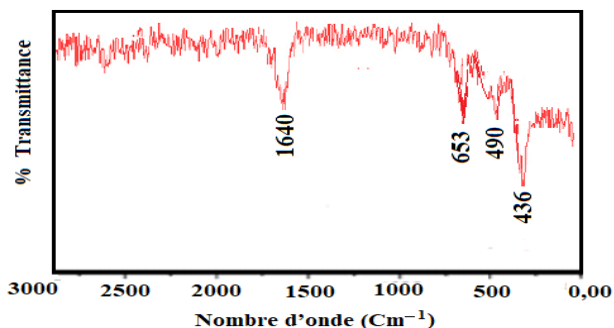


Figure 4 : Spectre FTIR de la poudres de TiO₂ utilisée

Les analyses par spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier (FTIR) exhibent les importantes bandes d'absorption localisées à des valeurs de nombres d'onde suivantes : 1640 cm⁻¹ et 653 cm⁻¹. La bande située à 1643 cm⁻¹ est caractéristique de la liaison (H-OH) dans la molécule d'eau et de la liaison Ti-OH. La bande apparaissant à 658 cm⁻¹ peut être due à la liaison Ti-O-O du dioxyde de titane. La bande de vibration d'un pic prépondérant situé à de 436 cm⁻¹ est caractéristique de la phase anatase et l'apparition du pic à 490 cm⁻¹ est attribuable à la phase rutile de TiO₂. Ces résultats prouvent davantage la

formation des phases cristallines (anatase et rutile de TiO₂) observées en bonne corrélation avec celles de DRX. (Maensiri et al, 2006 ; Djaoued et al., 2002).

3.2 Inactivation bactérienne (*E. coli*)

3.2.1 Interaction bactérie *E. coli* – catalyseur TiO₂ dans l'obscurité

Pour étudier l'adhésion (adsorption) bactérienne de *E. coli* vis à vis de la surface poreuse de TiO₂, un essai expérimental a été conçu en absence de la lumière (dans l'obscurité) avant le traitement photocatalytique. Une solution physiologique à un pH de 6.9 (solution de Ringer) contenant le chlorure de de calcium, de sodium et de potassium a été utilisée à 25°C.

Les concentrations bactériennes initiales sous étude (en nombre le plus probable par litre : NPP.L⁻¹) sont comprises entre 10⁴ NPP.L⁻¹ et 10⁷ NPP.L⁻¹. Partant de 20 mL d'un échantillonnage périodique on pouvait suivre l'évolution de la concentration bactérienne et pour mieux confirmer l'adhésion (de contact) de la bactérie *E. coli* à la surface de TiO₂, après une durée de 45 minutes, on prélève les échantillons puis on les lave avec de l'eau de qualité supérieure (Milli Q) puis on sèche ces échantillons à température ambiante.

Les échantillons séchés sont analysés sous un microscope électronique à balayage à émission de champ (FE-SEM ; JEOL JSM-6700F) bien équipée d'un spectrophotomètre à rayons X à dispersion d'énergie (EDAX) et fonctionnant à 20 kV. Les photographies de microscopie électronique à balayage des bactéries d'*E. coli* en présence et en absence de cristaux de catalyseur de TiO₂ Degussa P25 sont présentées dans les **figures 5**.

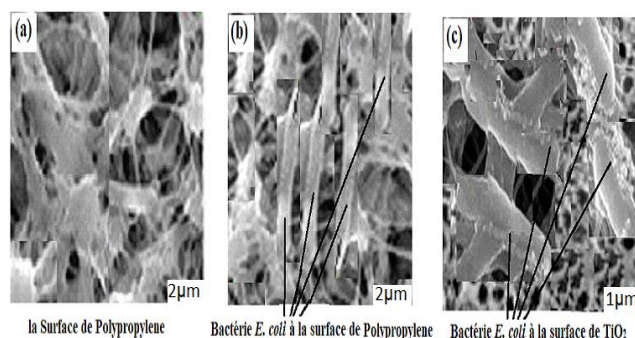


Figure 5: Observation des microphotographies (MEB) d'échantillons d'*E. coli*: (a) support en polypropylène seul ; (b) cellule de la bactérie de *E. coli* déposée sur un support en polypropylène ; (c) *E. coli* au bout de 45 minutes de contact avec le catalyseur Degussa P25

Le mécanisme de destruction bactérienne dans l'eau pendant le processus photocatalytique est fondé sur des attaques des membranes des bactéries par des radicaux oxydants (HO^\bullet et $\text{O}_2^{\bullet -}$) et comme les durées de vie de ces espèces oxydantes sont très faibles, le processus d'inactivation bactérienne sera effectivement favorisée dans le cas d'un contact, entre les bactéries *E. coli* et les particules de photocatalyseur de TiO_2 . Cette affinité (ou contact) peut qualitativement être mise en évidence dans une certaine mesure à partir d'observation de la microscopie électronique à balayage (voir figure 7).

La figure 5 (b), présente cellule de la bactérie de *E. coli* déposée sur un support en polypropylène et cette cellule en forme de tige (bacille) morphologiquement, de 6 μm à 7 μm de longueur. La membrane externe de la cellule exhibe un aspect lisse et continu qui montre que le milieu de dilution, utilisé dans cette investigation, n'a pas d'influence sur la morphologie de la bactérie de *E. coli*. Au contact de la bactérie de *E. coli* avec le catalyseur TiO_2 en absence de la lumière, la morphologie cellulaire de la bactérie est gardée intacte. Ceci prouve que le catalyseur de TiO_2 reste neutre en présence de la bactérie en absence de la lumière ultraviolette pendant le temps de contact étudié.

L'adhésion des bactéries *E. coli* dans la surface de TiO_2 dépend du rapport de la taille particules du catalyseur et de celle de la cellule bactérienne. Le catalyseur Degussa P25 est constitué des cristallites sphériques, ayant un diamètre moyen de 45nm. Ces dimensions étant significativement plus petites que celle la cellule bactérienne *E. coli* il est normal que beaucoup des grains de particules de TiO_2 (Degussa P25) vont adhérer à la surface externe de la bactérie grâce à des interactions électrostatiques de type Van der Waals de faibles énergies.

3.2.2 Effet thermique induit par la lumière solaire sur l'inactivation d'*E. coli* sans TiO_2

Il est bien établi que les radiations solaires sont accompagnées d'un effet thermique susceptible de contribuer à l'inactivation bactérienne. Pour isoler l'effet de la chaleur seule (et exclure les effets de la lumière), les réacteurs (bouteilles) ont été recouverts d'un film d'aluminium afin d'occulter les radiations électromagnétiques, tout en permettant le chauffage thermique par le rayonnement solaire.

Un échantillon témoin a été maintenu dans l'obscurité, à température ambiante ($\approx 26^\circ\text{C}$) dans une

chambre noire du laboratoire, tandis que les autres échantillons ont été soumis à des températures allant de 26 à 45 $^\circ\text{C}$, sous irradiation solaire thermique. Afin de limiter le stress osmotique sur les bactéries, les tests ont été conduits dans une solution saline (NaCl 0,9 % p/v). La concentration initiale en *E. coli* était d'environ 10^6 CFU/mL.

Avant l'introduction des bactéries dans les réacteurs (qu'ils soient à l'ombre ou sous irradiation), des prélèvements ont été effectués afin de vérifier l'absence de contamination initiale. L'évolution de la concentration bactérienne au cours du temps a été modélisée par une régression logarithmique (figure 5).

La figure 6 montre que, dans l'obscurité (à $\sim 26^\circ\text{C}$), la concentration d'*E. coli* varie très peu — ce qui indique une faible mortalité spontanée. Sous irradiation solaire thermique, la température interne du réacteur a pu monter jusqu'à $\sim 42\text{--}43^\circ\text{C}$ après quelques heures. On n'a observé aucune inactivation bactérienne pendant les premières trois heures, tant que la température restait inférieure à 40°C . Au-delà de ce seuil, une réduction rapide de la concentration bactérienne est apparue, culminant vers 43°C au bout de 5 heures (figure 4).

Ces résultats suggèrent que l'effet thermique seul n'est significatif qu'à des températures élevées ($\geq 40^\circ\text{C}$), ce qui limite son efficacité en conditions naturelles modérées.

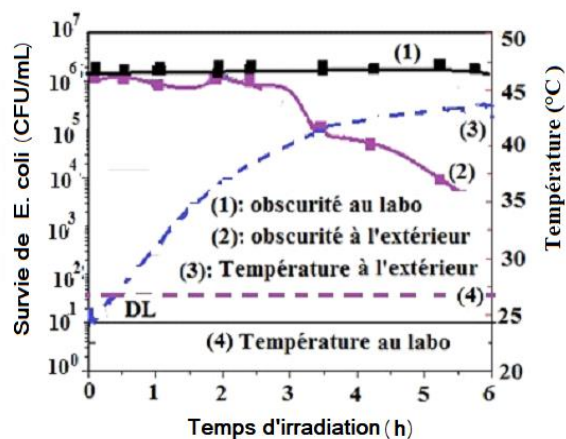


Figure 6 : Effet thermique de la lumière solaire sur l'inactivation d'*E. coli* (sans TiO_2), concentration initiale $\sim 10^6$ CFU/mL. Limite de détection (DL) : 10 CFU/mL.

La figure 5 (1) montre que la concentration de *E. coli* ne varie presque pas dans l'obscurité de laboratoire où la température est presque égale à 26°C (voir figure 5 (4)). Suite à l'irradiation solaire, la température a

augmenté (de 25 à 42°C) à l'intérieur du réacteur où les solutions ont été chauffées, et on a constaté une amélioration dans l'inactivation de bactéries d'*E. coli* surtout dans le domaine de températures élevées. On n'a pas observé une inactivation bactérienne pendant les trois premières heures où la température prélevée était inférieure à 40°C (voir figure 5 (2)).

Lorsque la température de la solution devient supérieure à 40°C, l'inactivation bactérienne commence à se manifester suite au réchauffement solaire des solutions présentes dans les bouteilles qui constituent les réacteurs dans nos expériences. Cette température d'inactivation atteint un maximum à environ 43°C après 5 heures d'irradiation solaire (voir figure 5 (3)).

Les prélèvements initiaux ont confirmé l'absence de contamination. L'évolution de la concentration bactérienne a été modélisée par régression logarithmique (figure 5). Les résultats montrent que, dans l'obscurité, la concentration d'*E. coli* reste stable, indiquant une faible mortalité spontanée. Sous irradiation solaire, la température interne du réacteur a atteint ~42–43 °C après 5 h. L'inactivation bactérienne n'a été observée qu'au-delà de 40 °C, soulignant que l'effet thermique seul n'est significatif qu'à des températures élevées.

3.2.3 Influence de la photolyse (irradiation UV) sur l'inactivation d'*E. coli* sans TiO₂

L'inactivation bactérienne dans ce contexte est également modélisée par une régression logarithmique, comme illustré à la figure 6.

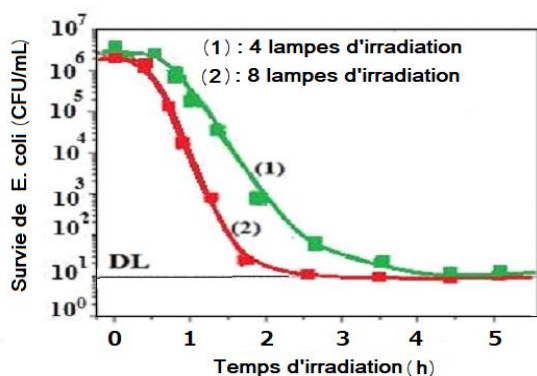


Figure 6 : Effet de l'intensité UV sur l'inactivation d'*E. coli* en fonction du temps d'irradiation.

Il ressort des courbes expérimentales, qu'en absence d'irradiation UV la concentration bactérienne décroît et cette observation prouve l'existence simultanée d'une adhésion bactérienne et de la réaction photocatalytique bien que cette diminution de la

densité globale bactérienne soit par comparaison faible à celui de la photocatalyse. La figure 6 fait ressortir d'existence d'une relation directe entre le taux d'inactivation bactérienne et la densité de flux de la lumière UV au cours du temps. Plus le nombre de lampes (intensité d'irradiation) augmente, plus le taux d'inactivation bactérienne est considérable.

Il est à signaler que les taux de réduction bactérienne pour une même quantité d'énergie absorbée, dans l'eau contaminée seraient plus importants que ceux obtenus dans les effluents réels parce que la présence de matières en suspension (autre que les bactéries cibles) présentes dans ces effluents inhibe l'inactivation bactérienne à cause de l'effet d'écran qui empêche la pénétration de la lumière dans le milieu réactif sous traitement.

De même, la présence des cations et anions (minéraux : SO₄²⁻, HCO₃⁻, Ca²⁺, Na⁺ et Mg²⁺) dans les effluents réels peuvent empêcher l'interaction entre les bactéries cibles et le catalyseur, en inhibant la destruction des bactéries. Les chercheurs Bekbölet & Balcioglu, (1996) signalent que les anions bicarbonates (HCO₃⁻) sont capables de piéger des radicaux oxydants hydroxyles OH pour produire des radicaux anions carbonates (CO₃^{•-}) ayant moins actifs et conséquemment la réaction d'inactivation bactérienne est efficacement très réduite.

Lorsque l'eau est exposée à un rayonnement UV de longueur d'onde inférieure à 185 nm, l'absorption peut provoquer la rupture homolytique des liaisons O–H, générant des radicaux hydroxyles OH• (Mudherwa M. F. et al., 2020 ; Musengele B. D. M. et al., 2024a ; Musengele B. D. M. et al., 2024b) selon la réaction suivante :



L'efficacité de la photolyse est évaluée par la réduction du nombre de bactéries restantes jusqu'à la limite de détection (10 CFU/mL), correspondant à une inactivation complète. Chaque point de la courbe représente la moyenne de trois mesures indépendantes sur le même échantillon.

Les résultats montrent que l'efficacité de l'inactivation dépend fortement de l'intensité de l'irradiation, ici représentée par le nombre de lampes UV utilisées. Avec 8 lampes, une irradiation de 2 h 15 min a suffi à atteindre l'inactivation complète, tandis qu'il fallait environ 4 h avec 4 lampes.

Les deux courbes présentent un palier (effet d'épaule) durant les 50 premières minutes. Ce

phénomène peut s'expliquer par une action bactériostatique : une faible absorption d'énergie UV permet aux cellules de survivre sans se reproduire, grâce à leurs mécanismes de réparation/d'endommagement (autodéfense). Une fois la dose absorbée suffisante, l'effet bactéricide devient dominant : les radicaux HO• endommagent l'ADN (notamment par dimérisation de la thymine), bloquant la division cellulaire et entraînant l'inactivation (photolyse) des bactéries (Mudherwa et al., 2020 ; Musengele et al., 2024a ; Musengele et al., 2024b).

L'efficacité de la photolyse est ainsi fonction de la dose UV absorbée, chaque point de la courbe représentant la moyenne de trois mesures indépendantes.

3.2.4 Inactivation d'*E. coli* sous irradiation UV en présence de TiO₂

L'inactivation par UV seule, bien que possible, demeure lente. Pour accélérer le processus, on introduit un photocatalyseur de la poudre poreuse de TiO₂ Degussa P25 dans le milieu réactionnel.

Une suspension bactérienne (~10⁶ CFU/mL) en solution saline (0,9 % NaCl) est irradiée sous UV en présence de différentes concentrations de TiO₂ (0,2 ; 0,5 ; 0,8 et 1,0 g/L). Les résultats sont présentés à la figure 6.

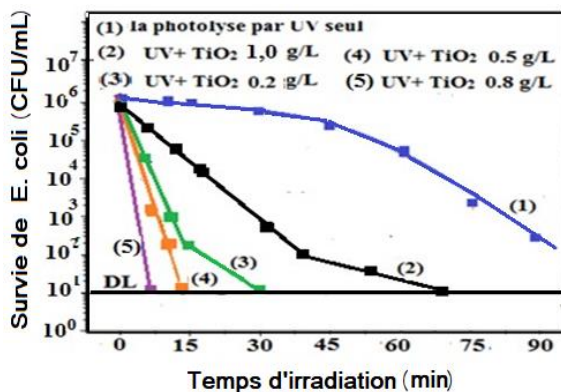
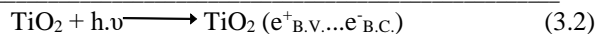


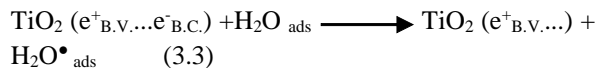
Figure 7 : Influence de la concentration de TiO₂ sur l'inactivation photocatalytique d'*E. coli*.

Sans catalyseur (photolyse), l'inactivation est lente et incomplète. Avec TiO₂, on observe un assainissement beaucoup plus rapide (Mudherwa et al., 2020 ; Musengele et al., 2024a ; Musengele. et al., 2024b). En théorie, lorsqu'un photon UV (hv) possède une énergie supérieure au gap de TiO₂ (~3,2 eV), il excite un électron vers la bande de conduction (BC), laissant un trou (h⁺) dans la bande de valence (BV) :



Où les sigles B.V. et B.C. sont relatifs respectivement à la bande de valence et à la bande de conduction.

L'eau adsorbée (H₂O_{ads}) interagit avec les trous pour générer des radicaux H₂O• :



Les radicaux H₂O• se scindent ensuite :



L'électron libéré peut être stabilisé en électron aqueux :



Les radicaux hydroxyles (OH•, E° ≈ 2,81 V vs ESH à 25 °C) sont des oxydants puissants, plus efficaces que le peroxyde d'hydrogène ou l'ozone (E° ≈ 1,77 V et 2,07 V, respectivement) ; ces espèces réactives oxydent rapidement les bactéries, contournant leurs mécanismes de défense (classiquement mentionné dans la littérature sur la photocatalyse) (Mudherwa et al., 2020 ; Musengele et al., 2024a ; Musengele. et al., 2024b).

Il est connu que la réalisation d'un système de désinfection nécessite une bonne compréhension de la cinétique d'inactivation de bactéries par le photocatalyseur. Dans le cas de la photocatalyse, on constate que l'inactivation bactérienne manifeste un effet synergique lié à la concentration en catalyseur et à la densité de flux lumineux. C'est pourquoi il est impératif de déterminer la combinaison la plus efficace entre la quantité du catalyseur et du flux d'irradiation qui permettrait un bon temps de contact bactérie-catalyseur afin d'accélérer la vitesse du processus d'inactivation. D'après la figure 3.6, toutes les concentrations de TiO₂ permettent une inactivation rapide, mais la meilleure performance est obtenue pour 0,8 g/L : l'inactivation totale (jusqu'à 10 CFU/mL) s'opère en ~8 minutes. Au-delà de cette concentration, un effet d'ombre ou d'auto-obstruction est observé car l'excès de particules en suspension dans le milieu réactionnel limite la pénétration du rayonnement UV et entrave l'efficacité photocatalytique.

Avant traitement, la concentration bactérienne était ~10⁶ CFU/mL. Sous irradiation UV seule (8 lampes, 254 nm), cette valeur tombe à 10 CFU/mL après ~2 heures. Par contraste, sous photocatalyse (TiO₂ = 0,8 g/L), l'inactivation complète est atteinte en

~8 minutes. Ces résultats illustrent l'efficacité du procédé photocatalytique UV/TiO₂, dans lequel le TiO₂ joue un rôle déterminant pour accélérer la désinfection (Mudherwa et al., 2020 ; Musengele. et al., 2024a ; Musengele et al., 2024b).

On a observé que l'usage des lampes UV seules (la photolyse par UV) dans le traitement de l'eau entraîne l'inactivation totale des bactéries *E. coli* mais cette opération prend beaucoup de temps. Pour réduire le temps, on introduit dans le milieu réactionnel un photocatalyseur comme les nanoparticules le dioxyde de titane en poudre (TiO₂ Degussa P25) à morphologie poreuse (la photocatalyse par UV+ TiO₂).

Pour bien suivre le phénomène d'inactivation des bactéries sous photocatalyse, une concentration initiale d'environ 10⁶ CFU/mL de *E. coli* a été mélangée avec l'eau distillée contenant 0.9 % de NaCl (Mudherwa et al., 2020).

Le résultat de l'effet de la concentration (0.2 g/L, 0.5 g/L, 0.8 g/L et 1,0 g/L) du catalyseur de TiO₂ utilisé sous UV sur l'inactivation des bactéries de *E. coli* est illustré sur la figure 6.

L'inactivation par UV seule reste lente. L'introduction de TiO₂ P25 poreux dans la suspension saline (~10⁶ CFU/mL) accélère considérablement le processus (figure 7). Différentes concentrations (0,2–1,0 g/L) ont été testées, la meilleure performance étant obtenue à 0,8 g/L, permettant une inactivation complète (~10 CFU/mL) en ~8 min.

Le mécanisme repose sur l'excitation des électrons du TiO₂ par les photons UV ($h\nu \geq 3,2$ eV), générant des trous (h⁺) et des électrons libres.

Les trous réagissent avec l'eau adsorbée pour produire des radicaux hydroxyyles OH•, puissants oxydants capables de détruire rapidement les bactéries, contournant leurs mécanismes de défense. Une concentration excessive de TiO₂ entraîne un effet d'ombre limitant la pénétration de la lumière et réduisant l'efficacité photocatalytique.

Ces résultats confirment que le système UV/TiO₂ présente un effet synergique entre concentration catalytique et flux lumineux, assurant une désinfection rapide et complète, bien supérieure à celle obtenue par UV seul.

3.3 Mécanisme d'inactivation d'*Escherichia coli* par photocatalyse hétérogène

La compréhension actuelle du concept de viabilité bactérienne est difficile à concevoir mais cependant la viabilité se réfère à la capacité d'une bactérie à se reproduire rapidement dans un milieu de culture tout gardant les caractères physiologiques qui montrent

l'existence de la membrane bactérienne dans son intégralité y compris l'activité métabolique.

En se basant sur la littérature, on note que pendant le traitement photocatalytique, beaucoup de mécanismes d'action interviennent sur l'inactivation bactérienne. Nous citons la combinaison de l'effet de radiation ultraviolette UVC et de l'action des radicaux oxydants (O₂^{•-} - HO•) produits au cours de photocatalyse.

Dans notre investigation pour qu'il y ait désinfection , les lampes UVC de longueur d'onde de 254 nm ont été utilisées or à cette longueur d'onde, la molécule d'ADN est capable d'absorber la lumière UVC et cette absorption d'énergie peut entraîner la formation de dimères de thymines adjacentes (cf. schéma de la figure 3.8 montrant un dimère de thymine) et le dimère peut créer des distorsions au niveau de la double hélice d'ADN avec comme conséquence des cassures au sein de la molécule d'hérédité qu'est l'ADN rendant impossible la multiplication bactérienne ; il y'aura la mort cellulaire ou l'apparition d'une génération des bactéries incapables de se reproduire (François Davaux et al,2011) .

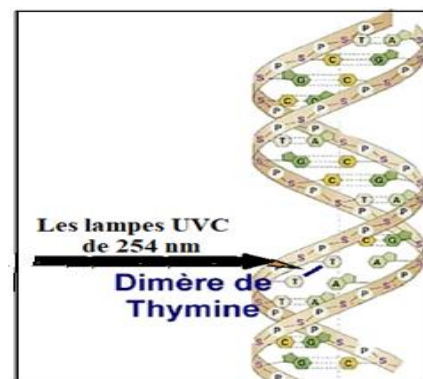


Figure 9: Action de radiations ultra-violettes UVC sur l'ADN : Dimérisation photochimique de deux bases de thymine

En outre, dans le cas de la photocatalyse, le mécanisme de destruction de l'ADN admis serait : les espèces radicalaires oxygénées générées lors de la photocatalyse comme les radicaux hydroxyyles OH• (oxydants) peuvent attaquer la paroi cellulaire bactérienne avec comme conséquences des endommagements structurels cumulatifs commençant d'abord dans un premier temps à la destruction membranaire de la cellule bactérienne, à travers une série de peroxydation lipidiques suivie après de la progressive destruction des constituants

intracellulaires, dont les molécules d'acide désoxyribonucléique (Maness., 1999).

3.4 Libération d'ions (anions et cations) lors de la destruction bactérienne

Sur le plan biochimique, l'éclatement bactérien sous photocatalyse peut libérer divers ions (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-). L'évolution de ces ions au cours du temps d'irradiation a été suivie par spectrophotométrie, les résultats étant résumés au [tableau I](#).

Tableau II : Concentrations des ions libérés (mg/L) au cours de la photocatalyse ($\text{TiO}_2 = 1,0 \text{ g/L}$) lors de l'inactivation d'*E. coli*

Temps d'irradiation (min)	0	15	30	60	75
Concentration (mg/L)					
Na^+	5,13	5,01	4,17	3,62	3,51
K^+	0,22	0,24	0,24	0,33	0,37
NH_4^+	0,17	0,16	0,15	0,31	0,37
Ca^{2+}	1,51	1,48	1,37	1,62	1,68
Cl^-	7,14	7,04	6,85	6,13	5,82

La désamination des acides aminés non absorbés par les bactéries lors de la photocatalyse entraîne une augmentation de la quantité des ions ammonium (NH_4^+) après destruction de la membrane bactérienne. Il est à signaler que la forme ammonium NH_4^+ , est lipophile et cela facilite sa dissolution dans les membranes bactériennes, et ce phénomène est à la base de l'augmentation de la quantité de NH_4^+ observée après la destruction de la membrane des bactéries (Mudherwa et al., 2020).

Cependant, il est connu que l'énergie stockée dans la liaison phosphate sous forme de l'ATP est utilisée pour la fabrication des biomacromolécules et ces composés jouent un grand rôle pour le maintien de la structure et surtout pour la survie et le fonctionnement des bactéries et la libération de cette énergie par les réactions exergoniques après la destruction de la membrane bactérienne et conséquemment on peut observer une augmentation de la quantité des ions potassium (K^+) à cause de la libération surtout que le mécanisme du transport de l'ion et de l'hydrolyse de l'ATP est entièrement le même.

En outre, après la destruction membranaire des bactéries, la diminution de la concentration des ions sodium Na^+ est liée à la perméabilité de la membrane bactérienne où la pompe sodium-potassium (pompe Na^+/K^+) y est attachée et pendant la destruction de la membrane, la pompe peut libérer les ions Na^+ dans le

milieu extracellulaire, ce qui entraîne une automatiquement une diminution des ions Na^+ extracellulaire et comme la membrane ne doit pas permettre la sortie de charges positives, cette diminution de la quantité extracellulaire en Na^+ peut automatiquement entraîner au niveau des canaux de fuite une sortie de potassium, pour stabiliser du potentiel membranaire.

Après la destruction de la membrane bactérienne, la quantité des ions calcium (Ca^{2+}) doit augmenter car l'ion Ca^{2+} est nécessaire pour la réalisation de contraction musculaire. En effet, le calcium intracellulaire libéré lors de la destruction de la membrane doit être pompé par la Ca^{2+} -ATPase vers le réticulum sarcoplasmique et ce pompage facilite l'hydrolyse de l'ATP et directement le transport de l'ion Ca^{2+} , qui contribue majoritairement pour la neurotransmission et la contraction musculaire.

La perméabilité sélective de la membrane cellulaire après la destruction de la membrane bactérienne fait diminuer la concentration en ions chlorure (Cl^-) car dans ce cas la membrane cellulaire empêche l'entrée les ions Cl^- tout en permettant la traversée de certaines substances c'est pourquoi lors de la destruction de cette membrane, il y'a échappement de la cellule des ions Cl^- , provoquant sa diminution intracellulaire (Yves & Jean-Pierre Gies, 2009).

3.5 Limites de l'étude

Cette a présenté quelques limites qui conduiraient à l'approfondissement ultérieur, notamment :

- L'absence éventuelle de mesure de la dose UV réellement reçue ;
- Le caractère indirect de certains marqueurs mécanistiques ;
- L'étude d'une seule souche bactérienne ;
- L'utilisation d'une matrice simplifiée plutôt que d'eaux usées réelles.

4. Conclusion

La photocatalyse TiO_2 (Degussa P25) sous irradiation UV (254 nm) permet l'inactivation rapide et complète d'*Escherichia coli*. Le TiO_2 seul, en obscurité, reste peu efficace, tandis que l'UV seul agit plus lentement. L'association $\text{TiO}_2 + \text{UV}$ génère des radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$) destructeurs des membranes et de l'ADN bactérien, avec une efficacité optimale à 0,8 g/L. La libération d'ions intracellulaires confirme la lyse cellulaire. Ces résultats confirment le potentiel de cette technologie comme solution

écologique pour la désinfection microbienne de l'eau et ouvrent des perspectives pour des applications réelles et le développement de photocatalyseurs améliorés.

En perspectives, nous envisageons d'autres tels, notamment :

- L'étude d'autres microorganismes ;
- L'analyse directe de l'intégrité membranaire ;
- La quantification des espèces réactives générées ;
- La validation du procédé dans des matrices aqueuses réelles.

Remerciements

Le Chef de Travaux Muderhwa Mulangala Fifi, témoigne de sa sincère reconnaissance à tous les membres de son équipe d'encadrement pour leurs contributions respectives au Laboratoire de Chimie sous radiation et photochimie environnementale. Les auteurs adressent leurs sincères remerciements au Professeur Ngbolua Koto-Te-Nyiwa Jean-Paul pour la qualité et la pertinence de ses critiques lors de la révision de la section microbiologique du manuscrit, ainsi que sa validation de la version finale.

Financement

Aucun financement externe n'a été accordé à cette recherche.

Conflit d'intérêts

Les auteurs affirment qu'il n'y a aucun conflit d'intérêts.

Considérations éthiques

Cette étude a été réalisée in vitro sur une souche bactérienne et n'impliquait ni sujets humains ni animaux. De ce fait, l'autorisation d'un comité d'éthique n'était pas requise, conformément aux standards internationaux de diffusion scientifique.

ORCID des Auteurs

Muderhwa M.F : <https://orcid.org/0009-0009-8795-9604>

Mbala M.B : <https://orcid.org/0000-0001-8020-6700>

Iyambe B.P : <https://orcid.org/0009-0006-0924-9787>

Disadisa M.P : <https://orcid.org/0009-0003-1035-5884>

Musengele B.D : <https://orcid.org/0009-0009-5598-6931>

Ndonganzadi T : <https://orcid.org/0009-0001-9151-2655>

Malongwe K.J : <https://orcid.org/0009-0003-0663-3925>

Muswema L.J : <https://orcid.org/0000-0001-6929-3006>

Mvele M.O : <https://orcid.org/0009-0008-4639-6932>

Ekoko B.G : <https://orcid.org/0009-0003-1523-1471>

Contribution des Auteurs

M.M.F. :

- Conceptrice initiale du sujet.
- Analyses bactériologiques dans différents laboratoires.
- Collecte, synthèse et interprétation de la littérature scientifique la thématique étudiée.
- Rédaction du manuscrit original (première version).

M.M.B. :

- Coordination de l'équipe, révision et lecture de la version finale, approbation avant soumission.
- Validation finale du texte proposé.
- Superviseur scientifique du travail.

I.B.P. :

- Apport méthodologique et analytique.
- Contribution à la collecte et à l'analyse de l'échantillonnage pour une meilleure reproductibilité et la fiabilité des résultats.

D.M.P. :

- Apport sur le renforcement méthodologique et analytique.
- Contribution à la méthodologie et à la rédaction initiale.
- Contribution sur le calibrage et validation de méthodes analytiques employées.

M.B.D. :

- Relecture critique du texte et amélioration de la présentation de tableaux.
- Contribution à la revision critique du texte final.

N.T. :

- Relecture critique du texte et amélioration de la présentation de tableaux.
- Contribution à la revision critique du texte final.

M.K.J. :

- Contribution à l'analyse formelle, de l'échantillonnage pour vérification de la reproductibilité.
- Contribution sur le calibrage et validation de méthodes analytiques employées.

M.L.J. :

- Correction des manuscrits et critiques.

- Traitement des données de caractérisation des produits chimiques.
- Révision et lecture de la version finale, approbation avant soumission.
- Validation finale du texte proposé.

M.M.O. :

- Correction des manuscrits et critiques.
- Révision et lecture de la version finale, approbation avant soumission.

E.B.G. :

- Supervision et correction du texte, perfectionnement du style, révision du contenu substantiel du manuscrit.
- Contribution significative à l'incorporation des tableaux et à l'interprétation des résultats, ainsi qu'une relecture minutieuse et rigoureuse du manuscrit.

Tous les auteurs ont examiné et validé la version finale du manuscrit et sont prêts à en porter la responsabilité scientifique.

Références bibliographiques

- Anses. (2017). *Avis du 18 mai 2017 relatif à la détection d'Escherichia coli producteurs de shigatoxines (STEC) considérés comme hautement pathogènes en filière viande hachée bovine*.
- Ao, X.-W., Eloranta, J., Huang, C.-H., Santoro, D., Sun, W.-J., Lu, Z.-D., & Li, C. (2021). Peracetic acid-based advanced oxidation processes for decontamination and disinfection of water: A review. *Water Research*, 188, 116479. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116479>
- Bekal, S., Brousseau, R., Masson, L., Préfontaine, G., Fairbrother, J., & Harel, J. (2003). Rapid identification of *Escherichia coli* pathotypes by virulence gene detection with DNA microarrays. *Journal of Clinical Microbiology*, 40, 2113–2125.
- Belloni, J. (2006). Nucleation, growth and properties of nanoclusters studied by radiation chemistry: Application to catalysis. *Catalysis Today*, 113, 141–156.
- Buxton, G. V., Greenstock, C. L., & Helman, W. P. (1988). Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals in aqueous solution. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 17(2), 513–759.
- Bui, T. H., Felix, C., Pigeot-Rémy, S., Herrmann, J. M., Lejeune, P., & Guillard, C. (2008). Photocatalytic inactivation of wild and hyper-adherent *E. coli* strains in presence of suspended or supported TiO₂: Influence of the isoelectric point, particle size and adsorptive properties of titania. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 11, 510–516.
- Chen, Y.-D., Duan, X., Zhou, X., Wang, R., Wang, S., Ren, N.-Q., & Ho, S.-H. (2021). Advanced oxidation processes for water disinfection: Features, mechanisms and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 409, 128207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128207>
- Chergui-Bouafia, S., & Alloune, R. (2007). Procédé d'oxydation avancée pour le traitement des eaux usées : principe d'application. *Revue des Énergies Renouvelables*, 163–170.
- Choi, S. W., Shahbaz, H. M., Kim, J. U., Kim, D. H., Yoon, S., Jeong, S. H., Park, J., & Lee, D. U. (2020). Photolysis and TiO₂ photocatalytic treatment under UVC/VUV irradiation for simultaneous degradation of pesticides and microorganisms. *Applied Sciences*, 10(13), 4493. <https://doi.org/10.3390/app10134493>
- Dunnill, C. W., & Parkin, I. P. (2011). Nitrogen doped TiO₂ thin films: Photocatalytic applications for healthcare environments. *Dalton Transactions*, 40, 1635–1640. <https://doi.org/10.1039/C0DT00494D>
- Ede, S., Hafner, L., Dunlop, P., Byrne, J., & Will, G. (2012). Photocatalytic disinfection of bacterial pollutants using suspended and immobilized TiO₂ powders. *Photochemistry and Photobiology*, 88(3), 728–735. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2012.01104.x>
- Ekoko, B. G., Jianian, S., XianRong, S., Dong, L., Moucheng, L., Juan, S., & Shudian, Y. (2007). Photocatalytic activity of manganese, chromium and cobalt doped anatase TiO₂ nanoporous electrodes produced by re-anodization method. *Thin Solid Films*, 515(13), 5287–5297.
- Ekoko, B. G., Lobo, K.-K. J., Mvele, O. M., Mbongo, K. A., Muswema, L. J., & Lefuni, Z. C. (2013). Optimization of experimental parameters in preparing multinanoporous TiO₂ thin films by the anodic oxidation method. *South African Journal of Chemistry*, 66, 1–6.
- Ekoko, B. G., Lobo, K.-K. J., Omer, M., Mvele, J. L., Muswema, J. F., & Yamambe, S. (2014). Effect of an external applied potential on the photocatalytic properties of manganese-doped titanium dioxide.

- American Journal of Physical Chemistry*, 3(4), 41–46.
- Ekoko, B. G., Muswema, L. J., & Lobo, K.-K. J. (2019a). Role of hydroxyl radical scavenger agents in preparing silver nanoparticles under γ -irradiation. *SN Applied Sciences*, 1, 961. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0973-7>
- Ekoko, B. G., Muswema, L. J., & Lobo, K.-K. J. (2019b). Nickel oxide nanocrystalline fabricated under gamma irradiation and its photocatalytic investigation for textile azo dye degradation. *Advances in Materials*, 8(3), 112–119. <https://doi.org/10.11648/j.am.20190803.13>
- Ekoko, B. G., Muswema, L. J., Mbongo, K. A., Nzazi Kambamba, N., Nduku Mafwa, F., Kidingi Kambasi, P., & Mukiatom, P. (2019c). Characterization of multianoporous Pt–TiO₂ thin films fabricated by a three-step electrochemical technique. *American Journal of Nanosciences*, 5(1), 9–17. <https://doi.org/10.11648/j.ajn.20190501.12>
- Gumy, D., Morais, C., Bowen, P., Pulgarin, C., Giraldo, S., Hajdu, R., & Kiwi, J. (2006a). Catalytic activity of commercial TiO₂ powders for the abatement of bacteria (*E. coli*) under solar simulated light: Influence of the isoelectric point. *Applied Catalysis B: Environmental*, 63, 76–84.
- Gumy, D., Rincon, A. G., Hajdu, R., Pulgarin, C., & Kiwi, J. (2006b). Solar photocatalysis for detoxification and disinfection of water: Different types of suspended and fixed TiO₂ catalysts studied. *Applied Catalysis B: Environmental*, 64, 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.11.012>
- Hedi, B. M., Oualid, B., & Dorra, D. (2011). Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : criblage de la toxicité et des méthodes de traitement. *Revue des Sciences de l'Eau*, 24, 209–238.
- ISO. (2007). *ISO 7218: Microbiology of food and animal feeding stuffs — General requirements and guidance for microbiological examinations*.
- ISO. (2014). *ISO 11133: Microbiology of food, animal feed and water — Preparation, production, storage and performance testing of culture media*.
- Jianian, S., Moucheng, L., Dong, L., XianRong, S., Ekoko, B. G., Shudian, Y., & Bin, W. (2007). Effects of applied bias and dopants on the photocatalytic degradation of aqueous dye solution by TiO₂/Ti electrode. *Materials Science Forum*, 539–543, 2240–2245.
- Landry, Y., & Gies, J. P. (2009). *Pharmacologie : des cibles vers l'indication thérapeutique*. Paris : Dunod.
- Luciano, F., Jean-Claude, L., Mathieu, A., Michel, D., & Harivony, R. (2019). *Introduction à la microbiologie : microbiologie fondamentale et appliquée*. Paris : Dunod.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H., & Stahl, D. A. (2021). *Brock Biology of Microorganisms* (16e éd.). Pearson.
- Mabiala, M. T., Kazadi, M. B. A., & Ekoko, B. G. (2016). Influence of pH preparation on the photo-response of electrodeposited titanium dioxide thin films. *International Journal of Materials Science and Applications*, 5(5), 207–213. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20160505.15>
- Maness, P. C., Smolinski, S. L., Blake, D. M., Huang, Z., Wolfrum, E. J., & Jacoby, W. A. (1999). Bactericidal activity of photocatalytic TiO₂ reaction: Toward an understanding of its killing mechanism. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(9), 4094–4098.
- Masoud, B. K. (2011). *Traitement des eaux usées colorées : procédé photo-Fenton hétérogène*. Éditions Universitaires Européennes.
- Muderhwa Mulangala F., Mbongo Kimpanza A., Iyambe Bulola P., Disadisa Maziana P., & Ekoko Bakambo G. (2020). Evaluation par Chloration de la Cinétique de Destruction d'*Escherichia coli*. Study Design Foundation/Washington, 1–23. <https://doi.org/10.46910/abusc04>.
- Muderhwa Mulangala F., Mbongo Kimpanza A., Iyambe Bulola P., Disadisa Maziana P., & Ekoko Bakambo G. (2020). Effet bactéricide de la poudre en suspension de TiO₂ dans la destruction d'*Escherichia coli* sous radiation UV de 254 nm. Study Design Foundation/Washington, 1–23. <https://doi.org/10.46910/abusc05>
- Musengele B. M. D., Muswema L. J., Lohohola O. P., Mvele O. M., Malongwe K. J., Disa Disa P. M., Kayembe J., Ndonganzadi T., Biayi E. M., Mbinza L., Muderhwa F. M., Musengele C. K., Mbundu C. L. & Ekoko G. B. (2024). Évaluation de l'effet bactéricide des nanostructures "sol-gel" de TiO₂ intrinsèque et Ag–TiO₂ dopé sur *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* et *Staphylococcus aureus*. *Journal Africain des Sciences*, 1(2), 157–169.
- Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2017a). *Guidelines for drinking-water quality* (4e éd.). Genève.

- Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2017b). Relevé épidémiologique hebdomadaire, 92(36), 521–536.
- Pigeot-Rémy, S., Simonet, F., Errazuriz-Cerda, E., Lazzaroni, J. C., Atlan, D., & Guillard, C. (2011). Photocatalysis and disinfection of water: Identification of potential bacterial targets. *Applied Catalysis B: Environmental*, 104, 390–398.
- Rincón, A. G., & Pulgarin, C. (2004). Bactericidal action of illuminated TiO₂ on pure *Escherichia coli* and natural bacterial consortia: Post-irradiation events in the dark and assessment of the effective disinfection time. *Applied Catalysis B: Environmental*, 49, 99–112.
- Rizzo, L., Della Sala, A., Fiorentino, A., & Li Puma, G. (2014). Disinfection of urban wastewater by solar driven and UV lamp TiO₂ photocatalysis: Effect on a multidrug resistant *Escherichia coli* strain. *Water Research*, 52, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.020>
- Roche, P. A. (2000). L'eau au XXI^e siècle : enjeux, conflits, marchés. *RAMSES 2001*, Ifri/Dunod, 5–42.
- Saratale, R. G., Saratale, G. D., Chang, J. S., & Govindwar, S. P. (2011). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42, 138–157.
- Sichel, C., Blanco, J., Malato, S., & Fernández-Ibáñez, P. (2007). Effects of experimental conditions on *E. coli* survival during solar photocatalytic water disinfection. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 189, 239–246.
- UNICEF. (2018). *Eau et assainissement : fiche d'information RDC*.
- UNICEF & WHO. (2018). *Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines*. New York.
- Verdier, T., Coutand, M., Bertron, A., & Roques, C. (2014). Antibacterial activity of TiO₂ photocatalyst alone or in coatings on *E. coli*: Influence of methodological aspects. *Coatings*, 4(3), 670–686. <https://doi.org/10.3390/coatings4030670>