

Inactivation de la bactérie Escherichia coli dans l'eau par le jus de citron

par

Yindé AGBOTA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 11 JUILLET 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Yindé Agbota, 2017



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Hausler, directeur de mémoire
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, président du jury
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monette, membre du jury
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 15 JUIN 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de mémoire, M. Robert Hausler, pour sa disponibilité et son écoute précieuse tout au long de ma maîtrise.

Merci également aux membres de mon jury, M. Mathias Glaus et M. Frédéric Monette, pour leur confiance en moi, leurs commentaires et remarques qui m'ont permis de bonifier ce rapport.

Merci aux étudiants et membres de la STEPPE pour leur bonne humeur et ces moments de détente très bénéfiques.

Un immense merci à mes amies Nanou et Safi qui ont toujours réussi à me rappeler le chemin parcouru et me faire voir le meilleur en moi dans mes moments de stress. Stéphane et Arsène pour leur précieuse aide et disponibilité quand j'en avais besoin. Tounde, pour sa confiance et sa présence malgré la distance.

Je remercie profondément ma famille pour leur soutien et leur encouragement, mes sœurs Gwen et Régina et particulièrement mes parents, qui m'ont tant donné, dans le silence de l'amour.

Je remercie finalement tous ceux qui, de près ou de loin, ont permis la réalisation de ce travail.

INACTIVATION DE LA BACTÉRIE ESCHERICHIA COLI AVEC DU JUS DE CITRON

Yindé AGBOTA

RÉSUMÉ

Chaque année, 500000 personnes décèdent à la suite de diarrhées causées par l'eau de boisson contaminée. Dans de nombreux pays en développement, l'accès à des moyens de traitement de l'eau reste encore problématique. Dans le cas où ces moyens existent, le chlore est le produit le plus utilisé. Néanmoins, son utilisation engendre des sous-produits toxiques potentiellement cancérogènes pour l'être humain. Les produits de désinfection chlorés étant moins accessibles dans certaines régions des pays en voie de développement, des alternatives de désinfection avec une approche locale doivent être développées.

L'objectif de ce projet est de déterminer l'efficacité du jus de citron pour désinfecter une eau contenant des bactéries *Escherichia coli*. Les essais réalisés en laboratoire ont permis de tester différents paramètres dont la concentration en jus de citron, la présence et l'absence de rayonnement UV et la concentration initiale en bactéries.

Il en résulte de cette étude une réduction du nombre de bactéries de 2 log en présence de 2 mL de jus de citron par 10 mL d'eau au bout de 2 min. Les résultats montrent également que le rayonnement UV est un facteur influençant l'inactivation de la bactérie. En présence de citron, le nombre de bactérie initiale est réduite de 1 log au bout de 100 minutes sous UV, tandis que la réduction est négligeable, car moins de 0.5 log à l'obscurité. L'étude du mécanisme de la réaction d'inactivation indique que la réaction pourrait être un phénomène complexe d'ordre 2.

L'utilisation du jus de citron en complémentarité d'un traitement comme celui aux UV du soleil pourrait s'avérer être une option de désinfection intéressante. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour assurer un contrôle de la qualité pour son application en conditions réelles.

Mots-clés : *Escherichia Coli*, désinfectant, eau potable, jus de citron

ESCHERICHIA COLI INACTIVATION BY LEMON JUICE

Yinde AGBOTA

ABSTRACT

Every year, 500000 people died after diarrhoea caused by contaminated drinking water. In some developing countries, access to water treatment is still problematic. In case they exist, chlorine is the most widely used product. Nevertheless, its use creates toxic residues that are potentially carcinogenic for humans. Due to chlorine-based disinfectants inaccessibility in certain areas of developing countries, the use of local disinfectant as an alternative to disinfection must be developed.

Thus this study estimates a potential of lemon juice to be able to disinfect water that contain *Escherichia coli*. Laboratory tests have allowed to test various parameters such as concentrations in lemon juice, the presence and absence of UV radiation and initial concentration of bacteria.

A certain quantity of lemon juice is introduced in unclear water for a specific amount of time. The results show that E.coli is being reduced by 2 log in the presence of 2 mL of lemon juice in two minutes. Furthermore, the light is a factor influencing the inactivation of the bacteria. With lemon juice, the bacteria were reduced by 1 log in 100 minutes under UV, while the reduction is insignificant under darkness. The inactivation mechanism indicates that the reaction could be a complex phenomenon of order 2.

The use of lemon juice with an additional treatment like UV treatment could be an interesting disinfection option. Further research is needed to ensure quality control for its application in real conditions.

Keywords: *Escherichia Coli*, disinfectant, drinking water, lemon juice

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Contamination de l'eau	3
1.1.1 Contamination physique et chimique.....	3
1.1.2 Contamination microbiologique	4
1.2 Potabilisation de l'eau.....	5
1.2.1 Dispositions réglementaires.....	6
1.2.2 Procédés de production d'eau potable	7
1.3 Désinfection	8
1.3.1 Objectif de la désinfection	8
1.3.2 Produits de désinfection classiques.....	8
1.3.3 Produits de désinfection naturels	10
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	19
2.1 Matériels et préparation des expériences	19
2.2 Expérimentation.....	20
2.3 Analyse	21
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	23
3.1 Teneur en acide citrique.....	23
3.2 Effet de la concentration en jus de citron.....	23
3.3 Influence de la concentration initiale en bactéries.....	25
3.4 Ordre de réaction.....	26
3.5 Effet du proton H ⁺	28
3.6 Influence de l'irradiation UV avec et sans acide citrique	29
CHAPITRE 4 DISCUSSION	31
CONCLUSION.....	35
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	39

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Normes bactériologiques.....	7
Tableau 1.2 Avantages et inconvénients des méthodes de désinfection.....	10
Tableau 1.3 Quantité d'acide organique dans les jus d'agrumes.....	14
Tableau 1.4 Pourcentage d'acide non dissocié à différents pH	17
Tableau 2.1 Concentration en acide citrique à partir	19
Tableau 2.2 Matériels et méthode d'analyse.....	21
Tableau 3.1 Valeur des constantes de vitesse	24
Tableau 3.2 Constantes de vitesse et coefficient de corrélation de l'ordre 2.....	28

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Diagramme de prédominance de l'acide citrique.....	16
Figure 3.1 Effet de la concentration en acide citrique sur l'inactivation de <i>E. coli</i>	24
Figure 3.2 Comparaison de l'effet de l'ajout d'acide citrique sur deux eaux différentes.....	25
Figure 3.3 Détermination de l'ordre de la cinétique de réaction	27
Figure 3.4 Effet du proton sur <i>E. coli</i> à température ambiante.....	29
Figure 3.5 Inactivation de la bactérie <i>E. coli</i> sous UV et sous obscurité.....	30

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

UV	Ultra-violet
THM	Trihalométhane
SODIS	Solar Disinfection
DGS	Direction Générale de la Santé
EPA	Environmental Protection Agency
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
UNICEF	Fonds des Nations Unies pour l'Enfance
CPEPESC	Commission de Protection des Eaux, du Patrimoine, de l'Environnement, du Sous-sol et des Chiroptères

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mL	Millilitres
g	Gramme
L	Litre
°C	Degré Celsius
M	Molaire
UFC	Unités formant colonies
Nm	nanomètre
Kg	kilogrammes

INTRODUCTION

L'eau est un élément indispensable à la survie des êtres vivants et est paradoxalement l'une des causes majeures de mortalité dans le monde. En 2015, c'est 9 % de la population mondiale et 32 % des habitants de l'Afrique sub-saharienne qui n'ont pas accès à de l'eau potable (OMS, 2015).

Pour garantir la qualité bactériologique de l'eau, plusieurs techniques de désinfection sont employées telles que l'ozonation, les ultraviolets, et la chloration. Bien qu'efficaces, ces techniques présentent certaines limites. Prenons pour exemple le chlore, peu cher et facile d'utilisation, qui est le produit le plus utilisé dans le monde (Guilherme, 2014). Cependant, il reste moins accessible dans certaines régions du globe. De plus, les études montrent que son utilisation engendre des sous-produits, comme la production des composés organochlorés potentiellement cancérigènes (Sadiq et Rodriguez, 2004). Quant à l'ozonation, son utilisation nécessite une consommation importante d'énergie. Ces constats justifient le besoin de trouver des alternatives de désinfection qui soient tout aussi efficaces, simples d'utilisation et accessibles aux populations en demande dans les pays en voie de développement. Une approche alternative consisterait à choisir des produits locaux, présentant des caractéristiques désinfectantes afin d'atteindre les standards réglementaires. Plusieurs produits naturels existant localement ont démontré un potentiel en termes d'efficacité de désinfection, dont les agrumes. Ces derniers font partie des fruits les plus produits dans le monde, avec une production annuelle de 80 millions de tonnes et les oranges, les mandarines et les citrons sont les plus consommés (Marzouk, 2013). D'ailleurs, dans plusieurs pays du monde, le jus de citron est connu pour ses propriétés antimicrobiennes, qui sont justifiées par sa forte proportion en acide citrique. Le jus de citron est fréquemment utilisé dans des plats ethniques pour ses propriétés acidifiantes, par exemple pour mariner de la viande crue ou partiellement cuite sur l'île de Guam (Yang et al., 2013), mais également pour le contrôle des bactéries pathogènes alimentaires présentes sur les fruits, les légumes frais et les poissons (Huang et Chen, 2011; Okeke et al., 2015; Sengun et Karapinar, 2004).

Les bactéries responsables d'infections intestinales sont en général *Escherichia coli* (*E. coli*), le *Salmonella Paratyphi B*. et le *Shigella sonnei* (Chakraborty, Chandran et Bhat, 2015). La présente étude sera restreinte à la bactérie *Escherichia coli*. L'élimination de la bactérie *Escherichia coli* dans l'eau présente un grand intérêt vu son importance comme indicateur d'une pollution fécale.

L'objectif général de cette étude consiste à vérifier l'efficacité du jus de citron en tant que désinfectant de l'eau. Les sous-objectifs du projet sont les suivants :

- déterminer le mécanisme d'action du jus de citron sur la bactérie *E. coli*;
- déterminer l'ordre de la réaction d'inactivation;
- évaluer l'influence de l'irradiation UV sur la vitesse de réaction.

Pour répondre à ces objectifs, le présent document a été subdivisé en plusieurs chapitres. Le premier chapitre présente l'état des connaissances et les différentes études en rapport avec le sujet traité. Le deuxième chapitre détaille la méthodologie utilisée pour répondre aux objectifs fixés. Ensuite, les résultats obtenus sont présentés et analysés dans le troisième chapitre. Ils sont ensuite interprétés sous la forme d'une discussion dans le quatrième chapitre. Une conclusion complète le document.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Contamination de l'eau

Bien qu'essentielle à la vie, l'accès à l'eau potable n'est pas répartie de manière équitable sur la planète. Dans le monde, une grande majorité de personnes utilisent encore des points d'eau contaminés. La mauvaise gestion des eaux urbaines, industrielles et agricoles impliquent une contamination et une pollution des eaux de boisson de milliards d'individus. En effet, 842 000 personnes meurent chaque année de diarrhée à cause de l'insalubrité de leur eau de boisson et du manque d'assainissement et d'hygiène (OMS, 2016). La contamination d'une eau peut être de nature physique, chimique ou microbiologique, voire radioactive.

1.1.1 Contamination physique et chimique

Les matières en suspension dans l'eau sont à l'origine d'une contamination physique. En effet, ces matières sont de très fines particules en suspension (sable, argile, particules de produits polluants, etc.), qui donnent un aspect trouble à l'eau (CPEPESC, 2014). Quant à la contamination chimique de l'eau, elle peut provenir des rejets agricoles, avec les nitrates et les phosphates qui sont l'une des causes majeures de la dégradation de la qualité de l'eau. En effet, leur apport se fait par l'utilisation des traitements chimiques dans l'agriculture (engrais chimiques azotés, herbicides, pesticides, etc.) et peuvent se retrouver dans les cours d'eaux lors de précipitation par lessivage des terres agricoles. Le phosphore peut également provenir de rejets domestiques, avec l'utilisation des lessives et autres détergents phosphatés (Adour-Garonne, 2013). L'effet de ces contaminants sur la santé a été démontré à travers des études, par certains auteurs comme Chen, Wu et Qian (2016), qui montrent le lien entre un cancer digestif et l'absorption de nitrates. Aussi, la méthémoglobinémie ou maladie des bébés bleus, est causée par la présence de nitrates dans l'eau de boisson. Elle est caractérisée par la capacité réduite du sang à transporter l'oxygène du fait de la diminution des niveaux d'hémoglobine

normale. C'est une maladie rare qui touche particulièrement les nouveau-nés nourris au biberon et à l'eau de puits (OMS, 2017).

Parmi les rejets domestiques, les résidus médicamenteux constituent une forme de pollution avec laquelle la population est de plus en plus confrontée. Retrouvés dans les selles et les urines, les médicaments ne sont pas complètement dégradés par les stations d'épuration et se retrouvent dans les eaux de surface. Aussi, l'ingestion de résidus médicamenteux est associée à la présence de cancer chez l'homme (Mater, 2014). Les rejets industriels constituent aussi une source de contamination de l'eau, avec la pollution des eaux par les métaux lourds (plomb, mercure, nickel, etc.), dus essentiellement à l'industrie métallurgique et aux installations minières abandonnées (Aduayi-Akue et Gnandi, 2014).

1.1.2 Contamination microbiologique

L'eau est un élément qui touche la santé humaine, plus spécifiquement par le biais de la contamination bactériologique. Cette dernière est l'une des principales causes des maladies associées à l'eau (Payment, 1998). En effet, l'OMS (2016) recense 1.8 milliards de personnes qui utilisent des points d'eau contaminés par des matières fécales, l'eau pouvant être contaminée pendant le transport ou le stockage, même lorsque la source est de bonne qualité.

L'eau contaminée peut provoquer des symptômes gastro-intestinaux comme des diarrhées et des vomissements. Elle peut également transmettre des maladies telles que la dysenterie, la typhoïde et la poliomyélite (Kauffmann-Lacroix et al., 2014; Rodier et Legube, 2009; Wallet et al., 2016). La diarrhée est la maladie la plus connue associée aux aliments et à l'eau contaminée.

Les maladies diarrhéiques sont une cause importante de mortalité dans le monde, particulièrement chez les enfants de moins de 5 ans et surtout dans les pays Africains du sous-sahara et en Asie du Sud. Chaque année, 500 000 personnes décèdent à la suite de diarrhées causées par l'eau de boisson contaminée (OMS, 2016). En 2015, la diarrhée est classée selon

l'OMS (2017) comme la 8^e cause de mortalité dans le monde, précédé de la démence (7^e cause), les infections respiratoires (3^e cause) et la cardiopathie ischémique (1^{re} cause). Dans les pays à revenus bas, la diarrhée est considérée comme la 2^e cause de mortalité, la 1^{re} étant les infections respiratoires.

Des germes indicateurs permettent de vérifier la qualité microbiologique d'une eau. À titre d'exemple, la présence de coliformes fécaux dans une eau signifie une contamination fécale d'origine humaine ou animale, mais également une présomption de la présence de micro-organismes pathogènes de toutes sortes qui peuvent y être associés (Payment et Hartemann, 1998). Ils constituent un sujet de santé publique, car ils sont infectieux à faibles doses et peuvent se transmettre par l'eau et la nourriture. La présence d'*Escherichia coli* dans les selles humaines et animales est l'une des raisons de son utilisation comme indicateur de pollution fécale dans l'environnement, principalement dans l'eau (Abia, Ubomba-Jaswa et Momba, 2016).

Plusieurs études relatent les effets de la bactérie *E. coli* sur la santé humaine et reportent la présence de bactéries *E. coli* diarrhéiques dans des échantillons environnementales, aussi bien dans les pays industrialisés qu'en développement (Abia, Ubomba-Jaswa et Momba, 2016). Ainsi, Croxen et al. (2013) soulignent les avancées sur la compréhension des mécanismes impliqués dans les bactéries *E. coli* responsables des maladies diarrhéiques. Dans son étude sur l'inactivation de *E. coli* dans les jus de fruits, Espina et al. (2012) rapportent que *E. coli* est le pathogène le plus résistant à éliminer pour assurer la sécurité des consommateurs. Des données recueillies par l'étude multicentrique mondiale des germes entériques (GEMS), relatent que *E. coli* est parmi les quatre principaux agents causant des diarrhées modérées à sévères en Afrique sub-saharienne et en Asie du Sud (Levine et al., 2012).

1.2 Potabilisation de l'eau

Les rejets impliqués par les activités humaines augmentent la pression exercée sur la qualité de l'eau. Les réglementations deviennent donc plus exigeantes et les moyens d'analyse de

détection des contaminants plus sensibles. La potabilisation de l'eau peut être expliquée comme le moyen d'avoir une eau potable de qualité, à travers des buts spécifiques ou des standards établis par l'utilisateur ou la communauté à travers des agences réglementaires (Howe et al., 2012).

1.2.1 Dispositions réglementaires

La production d'une eau potable se fait par l'exploitation de diverses sources d'approvisionnement. On peut citer par exemple les eaux de surface, les eaux souterraines et l'eau de pluie. Certaines substances présentes dans ces eaux peuvent présenter des risques pour la santé. Des normes établissant des concentrations acceptables maximales de ces substances dans l'eau potable sont donc mises en place pour assurer une qualité d'eau adéquate à la consommation humaine. Ces normes sont de nature bactériologiques, physico-chimiques et relatives au traitement de l'eau. Le tableau 1.1 présente les normes bactériologiques au Québec, en France, aux États-Unis et les normes établies par l'OMS. Le tableau montre que les normes bactériologiques établies par l'OMS et dans ces trois pays sont sensiblement les mêmes.

Tableau 1.1 Normes bactériologiques
Tirées de : (DGS, 2005; EPA, 2012; Ministère du Développement Durable, 2017; OMS, 2011)

Lieu	Normes bactériologiques
Québec	- Absence d'organismes pathogènes, d'indicateurs de contamination fécale (<i>E. coli</i>, entérocoques, etc.) - Pas plus de 10 coliformes totaux dans 100 mL d'eau prélevée
France	- Absence d'<i>E. coli</i> dans 100 mL d'eau - Absence d'entérocoques dans 100 mL d'eau
États-Unis	- Absence de coliformes totaux - Absence de coliformes fécaux
OMS	- Absence d'<i>E. coli</i> dans 100 mL d'eau

1.2.2 Procédés de production d'eau potable

Le traitement de l'eau se fait en plusieurs étapes en fonction de la nature de la pollution et diffère selon les stations de production d'eau potable. Le processus de traitement consiste généralement à une filière comprenant le prétraitement, la désinfection, suivi du post-traitement. La première étape est donc le dégrillage, où l'eau puisée de sa source est débarrasser des gros débris (papier, plastiques, etc.). Ensuite, le sulfate d'aluminium, qui agit comme coagulant est injecté dans l'eau brute et favorise l'agglomération des particules en suspension. Un ajout de silice activée à l'aluminate de soude agit comme aide coagulant avant la décantation. Les flocons formés décantent et se déposent au fond du bassin. La filtration est un processus important dans la purification de l'eau. Le passage à travers des filtres à sable et à anthracite termine la clarification de l'eau. Ensuite, l'ozonation assure la destruction des bactéries, des virus, ainsi que l'élimination des goûts et des odeurs indésirables. La filtration sur charbon actif débarrasse l'eau de ses substances biodégradables susceptibles d'occasionner une recroissance bactérienne dans le réseau. Étant donné que la qualité microbiologique d'une eau n'est pas stable, l'eau est chlorée. L'avantage du chlore est sa capacité résiduelle pour empêcher la prolifération de bactéries dans le réseau de distribution (Sainte-Rose, 2003).

1.3 Désinfection

1.3.1 Objectif de la désinfection

La désinfection est un procédé qui permet d'éliminer ou d'inactiver des microorganismes pathogènes, dans le sens où elle empêche leur développement ou reproduction (Rodier, Legube et Merlet, 2009), de telle sorte que ces microorganismes soient incapables de causer des maladies. Elle inclut également dans certains cas une quantité résiduelle, qui garantit la rémanence du produit désinfectant dans le système de distribution.

1.3.2 Produits de désinfection classiques

Il existe différentes méthodes de désinfection. Elles peuvent être de nature physique (ultra et microfiltration, traitement UV par exemple), ou chimique (chloration, ozonation par exemple).

La technique de la filtration consiste à faire passer l'eau à travers une membrane pour retenir des particules en suspension, des bactéries et virus, etc. La différence entre l'ultra et le micro est la taille des pores. Contrairement à la microfiltration, les virus de par leur petite taille, peuvent être éliminés avec l'ultrafiltration (LMS, 2017).

Dans le cas du traitement aux UV, les bactéries présentes dans l'eau sont exposées aux longueurs d'onde germicides du rayonnement UV (entre 200 et 300 nm). Selon la quantité d'UV reçue, les cellules sont inactivées ou détruites (Pfeiffer, 2013; Soumia, 2013; Tondera et al., 2016).

La chloration consiste à injecter du chlore dans l'eau à traiter et laisser agir pendant un certain temps (Cossec et al., 2016; Gbedenu, 2013; Guilherme, 2014). Dans la désinfection de l'eau potable, le chlore est le plus souvent utilisé sous forme de chlore gazeux ou d'hypochlorite de sodium couramment appelé eau de javel. Il présente l'avantage d'être efficace et surtout, est doté d'un pouvoir rémanent qui permet la continuité de la désinfection dans les réseaux de

distribution. Néanmoins, son utilisation peut engendrer des sous-produits toxiques comme les trihalométhanés (THM) (Dyck et al., 2015; Gruau, 2004; Sadiq et Rodriguez, 2004) qui sont potentiellement cancérogènes pour l'homme. Aussi, il a été observé que les conditions environnementales de la saison estivale favorisent une augmentation du niveau de ces contaminants dans les grands réseaux de distribution (Guilherme, 2014; Sadiq et Rodriguez, 2004).

Un autre moyen de désinfection de l'eau est l'ozonation (Bermúdez-Aguirre et Barbosa-Cánovas, 2013; Shah et al., 2015; Wu et al., 2016). Il est généralement créé par l'action de décharges électriques ou par des rayons UV à une longueur d'onde de 185 nm en présence d'oxygène. Des bulles d'ozone ou trioxygène O_3 sont insufflées dans l'eau à traiter. Cet oxydant puissant peut tuer les bactéries pathogènes en quelques secondes comparé aux autres oxydants. Le tableau 1.2 expose les avantages et inconvénients des méthodes dont les caractéristiques ont été expliquées précédemment.

Tableau 1.2 Avantages et inconvénients des méthodes de désinfection

	Avantages	Inconvénients
Microfiltration Ultrafiltration	Système simple Ne nécessite pas de produits chimiques	Peut être coûteux sur le long terme car changement de membrane requis
Chloration	Accessible et économique Utilisation simple Effet rémanent	Dérivés chlorés toxiques Goût chloré de l'eau Transport et stockage du produit Efficacité dépendant du pH
Ultraviolet	Pas de stockage de produits chimiques Pas de dérivés ni de résidus laissés dans l'eau Les bactéries pathogènes résistantes au chlore sont facilement inactivés par la lumière UV	Consommation immédiate de l'eau, car inactivation et non élimination des bactéries Les particules dans l'eau peuvent interférer avec les rayons UV et en diminuer l'efficacité
Ozonisation	Pas de dérivés dans l'eau Production sur place Large gamme d'application Efficace contre les protozoaires contrairement à la chloration	Consommation d'énergie Investissement de départ important Certains matériaux non résistants à l'ozone

1.3.3 Produits de désinfection naturels

L'intérêt pour l'utilisation des produits naturels comme alternative aux traitements chimiques est grandissant. En effet, bien que l'efficacité des traitements conventionnels soit bien reconnue, des inconvénients sont liés à leur utilisation. Entre autres, la résistance des bactéries pathogènes et les effets secondaires de ces traitements sont souvent relatés. Les effets secondaires liés à l'utilisation des traitements chimiques sont particulièrement retrouvés dans le traitement de l'eau. Les sous-produits de la chloration sont beaucoup documentés, mais plusieurs auteurs rapportent également les propriétés carcinogènes et la neuro toxicité des

résidus laissés par les sels d'aluminium dans le traitement de l'eau, ainsi que leur lien avec la maladie d'Alzheimer (Chakraborty, Chandran et Bhat, 2015; Diaz et al., 1999; Šćiban et al., 2009; Yin, 2010). En effet, les agents coagulants comme les sels d'aluminium sont une étape importante avant la désinfection de l'eau, car ils permettent la clarification de cette dernière, à travers l'élimination des matières en suspension (débris organiques, sable, etc.) et des colloïdes (virus, bactéries, etc.). Aussi, le coût associé à leur utilisation les rend moins adaptés aux communautés des pays en voie de développement.

Pour répondre à ces défis, l'intérêt s'est donc porté vers des alternatives naturelles. En effet, la méthode SODIS permet d'éliminer les bactéries pathogènes dans l'eau de boisson en utilisant l'irradiation directe et naturelle du soleil (Helali et al., 2014). Elle permet la désinfection de l'eau dans des bouteilles en poly téréphtalate d'éthylène (PET) posées sur un toit en tôle. La méthode SODIS a été étudiée pour la première fois par Acra et al. (1980), avec une quantité d'eau d'environ 3 L. Au bout d'une heure, il n'y avait plus de coliformes dans l'eau. Plus tard, de plus en plus d'études ont été faites sur le sujet, et Joyce et al. (1996) montrent que dans une eau fortement turbide, une inactivation totale des bactéries pourrait avoir lieu avec les rayons du soleil seulement si la température de l'eau atteint au moins 55°C. Aussi, l'effet de la lumière du soleil comme indicateur de la survie des bactéries dans l'eau de mer a été étudié par Fujioka et al. (1981). Les auteurs ont démontré que les bactéries sont inactivées en quelques heures en présence des rayons du soleil, tandis qu'elles persistent pendant des jours en l'absence de lumière. Ces résultats sont confirmés par d'autres auteurs qui rapportent que la lumière visible possède un effet négatif sur les cellules de *E. coli* dans l'eau de mer et limite leur survie. En effet, Barcina et al. (1989) remarquaient peu ou pas de changement dans le nombre de coliformes dans un système non illuminé en 100 heures, tandis qu'ils observaient une réduction de coliformes de 4 à 5 log dans le système illuminé. Dans l'étude de Gourmelon (1995), le nombre de bactéries *E. coli* est réduit de 6 log en 40 minutes à la lumière visible, tandis qu'à l'obscurité, moins de 1 log de réduction est observé dans le même laps de temps. Les bactéries perdent progressivement leur capacité de multiplication. Elles peuvent néanmoins retrouver leur viabilité si les conditions redeviennent favorables.

La méthode SODIS est déjà utilisée par plusieurs familles en Afrique du Sud, au Cameroun, au Sénégal et en Inde. Néanmoins, des facteurs comme le risque de recroissance des bactéries en cas de stockage de l'eau et la présence de pathogènes résistants à l'irradiation du soleil peuvent en diminuer son efficacité (Gu, Wan et Wang, 2004; Lalitha et Devi, 2016; Wegelin et Sommer, 1998).

D'autres alternatives aux traitements chimiques de l'eau existent dans le monde. L'efficacité des huiles essentielles en tant que désinfectants a été démontrée par quelques auteurs. Après avoir réalisé des tests avec et sans huile essentielle de citron à la même température de 60°C, Espina et al. (2012) ont observé que la présence de l'huile essentielle de citron a permis de réduire le temps requis pour inactiver la bactérie *E. coli* dans du jus de pomme. Aussi, l'utilisation de huile essentielle d'origan a permis de réduire le nombre de coliformes présent dans 100 mL d'eau usée à un niveau non détectable (Winward et al., 2008).

L'efficacité des graines de *Moringa oleifera* comme coagulant dans le traitement de l'eau est bien connue. Il est le plus étudié dans la communauté scientifique en tant que coagulant naturel. Le *Moringa oleifera* est connu pour ses multiples utilisations et est souvent utilisé comme nourriture et en médecine dans les communautés des pays en voie de développement. Les communautés rurales dans des régions africaines utilisent les graines de moringa pour clarifier l'eau turbide (Folkard et Sutherland, 2002; Nordmark, Przybycien et Tilton, 2016; Sutherland, Folkard et Grant, 1990; Yin, 2010). Non seulement la clarification de l'eau permet d'éliminer une partie des bactéries à travers l'élimination des colloïdes, mais le pouvoir germicide des graines de moringa est aussi rapporté dans la littérature (Antov, Šćiban et Petrović, 2010), ce qui en fait un produit intéressant pour la désinfection.

Pour certains scientifiques, l'agent coagulant présent dans la graine de moringa est une protéine cationique dont la masse moléculaire diffère selon l'auteur (Gassenschmidt et al., 1995; Ghebremichael et al., 2005). D'autres prétendent qu'il s'agit d'un poly électrolyte organique (Okuda et al., 2001). Malgré les divergences dans la communauté scientifique sur la nature exacte de l'agent coagulant du moringa, la majorité d'entre eux s'entendent sur le fait que les

agents coagulants du moringa sont des protéines cationiques et que son mécanisme principal de coagulation est l'adsorption et la neutralisation de la charge (Yin, 2010). En effet, les impuretés présentes dans l'eau portent souvent des charges négatives et les cations sont les plus efficaces à les coaguler, ce qui correspond bien aux propriétés des graines de moringa comme coagulant.

De plus en plus d'études ont été faites avec d'autres plantes ayant des propriétés similaires aux graines de *Moringa oleifera*. Ainsi, les tests effectués dans l'étude de Diaz et al. (1999) montrent l'efficacité du *Cactus latifaria* et des graines de *Prosopis juliflora* comme coagulants dans le traitement de l'eau. Ils suggèrent que le mécanisme de ces deux coagulants qui contiennent des protéines en quantité variable est fort probablement semblable à celui du moringa. On pourrait ainsi s'attendre à ce que leur pouvoir germicide soit semblable à celui du moringa, ce qui en ferait des produits intéressants en tant que désinfectants naturels. Aussi, les résultats obtenus dans l'étude de Fatombi et al. (2009) démontrent que la caséine acide extraite de la crème de *Cocos nucifera* a un pouvoir coagulant supérieur à celui des graines de *Moringa oleifera*. Bien que cette dernière puisse pousser ailleurs que dans les régions tropicales, les auteurs Šćiban et al. (2009) ont voulu tester des plantes abondantes en Europe. Ainsi, leurs expérimentations ont confirmé l'activité coagulante des graines de marron européennes et des glands de chêne.

Hormis les plantes, les propriétés des composés bioactifs présents dans les fruits ont également été étudiées pour le traitement de l'eau. Les agrumes sont les fruits du genre *Citrus*, dont les plus populaires sont les oranges (*Citrus sinensis*), les mandarines (*Citrus reticulata*), les citrons (*Citrus limon*) et les pamplemousses (*Citrus paradisi*). La culture des agrumes est l'une des plus importantes dans le monde, avec une production de plus de 80 millions de tonnes par an (Marzouk, 2013). Le citron représente la troisième en terme de production mondiale des agrumes, derrière les oranges et les mandarines (González-Molina et al., 2010). Les fruits du genre *Citrus* sont riches en vitamines C, en folate, en minéraux, en aminoacides et en caroténoïdes entre autres, mais ils sont majoritairement composés d'acides organiques et de sucres (Li-ying et al., 2008).

Le tableau 1.3 montre la quantité des principaux acides organiques dans les citrons, oranges, mandarines et pamplemousses, les fruits les plus communs du genre *Citrus*. Bien que la composition des acides varie en fonction du climat, des conditions de culture, de l'origine et de la variété (Niu et al., 2008), les valeurs du tableau 1.3 permettent d'apprécier les proportions contenues dans chacun d'eux.

Tableau 1.3 Quantité d'acide organique dans les jus d'agrumes
Tiré de (Violeta, Trandafir et Ionica, 2010)

Fruit	Acide citrique (g/L)	Acide malique (g/L)	Acide ascorbique (g/L)	Acide oxalique (g/L)
Orange	13.9	1.51	0.636	0.109
Citron	73.9	1.46	0.718	0.094
Mandarine	12.7	1.77	0.515	0.088
Pamplemousse	23.0	0.089	0.580	0.117

Les données montrent que l'acide citrique est celui le plus abondant dans les fruits et que le citron est celui ayant la plus grande quantité d'acide citrique. Même en tenant compte de la variation des proportions comme indiqué plus haut, l'abondance de l'acide citrique dans ces fruits est confirmé par des analyses faites par plusieurs auteurs (González-Molina et al., 2010; Violeta, Trandafir et Ionica, 2010).

L'acide citrique est connu pour avoir des propriétés antibactériennes. Elles sont ainsi attribuées au jus de citron grâce à sa forte concentration et à sa quantité majoritaire en acide citrique (Nii et al., 1997; Okeke et al., 2015). Pour mettre en évidence cette propriété, des essais ont été effectués avec des granulés d'acide citrique mixés dans de l'eau sur des carottes, de la laitue et des tomates (Bermúdez-Aguirre et Barbosa-Cánovas, 2013). Ces derniers ont été trempés dans de l'eau ayant été préalablement contaminée par une culture bactérienne. Aucune inactivation de *E. coli* n'a été observée après 15 minutes de traitement sur la carotte et la laitue

avec les concentrations en acide citrique utilisées (0.5, 1.5 et 3 %). Dans le cas de la tomate, une inactivation de 0.7 log est observée après 9 min de traitement seulement avec 3 % de concentration en acide citrique. Les expériences ont été réalisées avec un nombre initial de bactéries de 10^7 - 10^8 UFC/mL de solution microbienne. La conclusion tirée est que l'efficacité de désinfection est influencée non seulement par la concentration de désinfectant et le temps d'exposition, mais aussi par la surface du produit. Dans ce cas-ci, la surface lisse de la tomate permettrait de faciliter le contact du désinfectant avec les bactéries. Avec une surface plus complexe, plus poreuse ou rugueuse, l'inactivation semble réduite.

Après avoir trempé des morceaux de carottes pendant un temps déterminé dans une quantité de jus de citron assez pour en recouvrir toute la surface, une inactivation immédiate de la bactérie *Salmonella* a été observée (Sengun et Karapinar, 2004). Les résultats obtenus dans cette étude montrent une inactivation maximale de 3.95 log UFC/g de carottes après 1h dans le jus de citron avec un nombre initial de bactéries de 6.27 log UFC/g de carottes. L'efficacité du jus de citron en tant qu'agent antibactérien est également confirmée par Yang et al., (2013). Leur objectif consistait à identifier l'effet inactivant du jus de citron sur la bactérie *E. coli* dans la marinade de bœuf. Leurs résultats montrent que plus la quantité de jus de citron est élevée, plus vite se fait l'inactivation des bactéries présentes sur la viande. Aussi, dans leur étude sur l'activité antibactérienne des jus de fruits sur la bactérie *Vibrio*, Tomotake et al., (2006) ont comparé les jus de citron, de lime et de sudachi. Ils ont pu établir le lien entre l'efficacité du jus avec sa concentration en acide citrique. Bien que les trois jus aient montré leur efficacité sur les bactéries, le jus de sudachi est celui montrant le plus d'efficacité, et c'est aussi celui présentant la proportion en acide citrique la plus grande. Aussi, ils remarquent qu'en ajustant le pH de la sauce à 4.5 et plus, le jus de sudachi ne montrait aucune activité antibactérienne. En effet, il ressort de plusieurs études que la valeur du pH et le nombre d'acide indissocié sont deux facteurs importants dans le processus d'inactivation. Dans l'étude sur la marinade de bœuf citée plus haut, les résultats permettent d'énoncer que plus le pH du milieu augmente, plus le temps pour inactiver 90 % de la population bactérienne augmente aussi. Également, plus la quantité d'acide citrique indissocié augmente, moins l'inactivation nécessite du temps (Yang

et al., 2013). Comme le nombre d'acide indissocié est lié au pH bas du milieu, ces deux facteurs sont donc importants pour obtenir une inactivation maximale.

Ce mécanisme est expliqué en prenant l'exemple de l'acide citrique dont la formule semi-développée est la suivante : $\text{HOOC-CH}_2\text{-C(OH)(COOH)-CH}_2\text{-COOH}$. Sa formule sera simplifiée sous forme AH_3 pour la suite, car il s'agit d'un triacide. Il est donc en mesure de libérer trois protons, mais en fonction du pH du milieu, chaque espèce y est présente avec une proportion différente comme représenté sur la figure 1.1

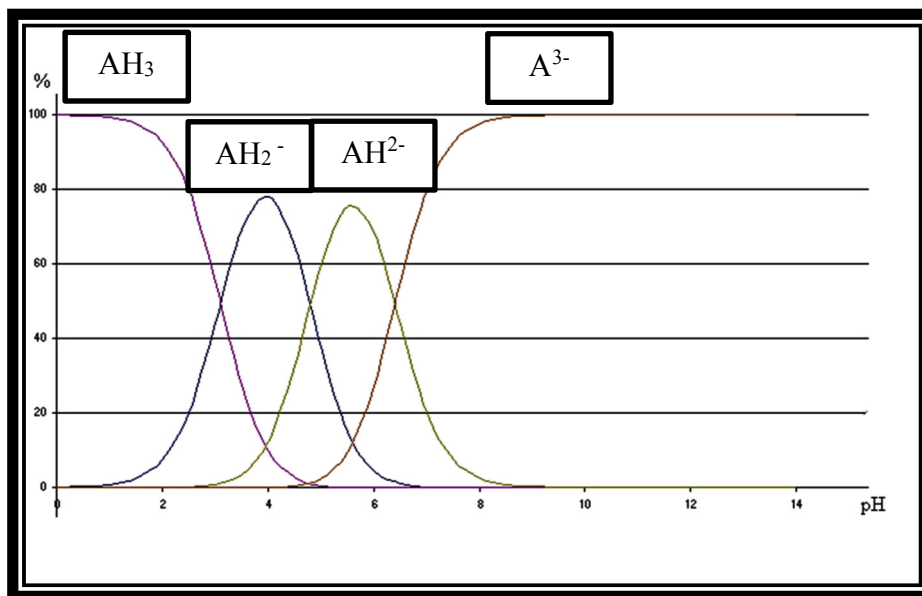


Figure 1.1 Diagramme de prédominance de l'acide citrique
Tirée de (Marsal, 2004)

Le mécanisme de réaction de base est le suivant :

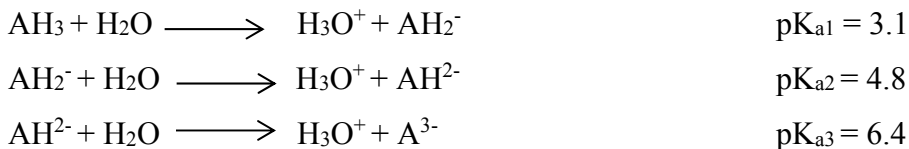


Tableau 1.4 Pourcentage d'acide non dissocié à différents pH
Tiré de (Corpet, 2014)

Acide organique	pH 4	pH 5	pH 6
Acétique	84	35	5
Citrique	19	0,4	0,006
Lactique	6	6	0,6

Le tableau 1.4 montre que plus le pH est bas, plus la forme non dissociée prédomine. Par conséquent, plus le pH est bas et plus l'effet de l'acide faible sur la bactérie est présent. Il faut que le pH de la solution soit inférieur au $\text{pK}_{\text{a}1}=3.1$ pour avoir une prédominance de la forme AH_3 de l'acide.

La forme indissociée des acides faibles étant lipophiles et cytotoxique (Tomotake et al., 2006), ils sont capables de traverser la membrane pour agir directement sur le pH cytoplasmique. Étant donné que le pH à l'intérieur de la cellule est plus élevé (environ 7), l'acide se dissocie rapidement et libère son proton H^+ , ce qui affecte la capacité des cellules à maintenir l'homéostasie du pH (Futhazar, 2014). La libération du proton H^+ dans les cellules provoque ainsi un choc osmotique qui conduit à la mort ou à l'inhibition des bactéries.

Bien que l'acide citrique soit un acide organique connu pour ses propriétés antimicrobiennes, il n'est pas le seul. En effet, l'acide acétique contenu dans le vinaigre est un acide organique possédant également ces mêmes propriétés. D'ailleurs, le tableau 1.4 montre que la proportion en acide non dissocié à pH 4 de l'acide acétique est supérieure à celle de l'acide citrique. Dans

l'étude sur l'inactivation de la bactérie *Salmonella* sur des morceaux de carottes, le vinaigre a montré un effet désinfectant dès le début du traitement. De meilleurs résultats ont été obtenus en combinant le vinaigre au jus de citron. Au bout de 30 min, la quantité de bactéries restantes était indétectable, soit inférieure à 1 log/g de carottes. Ces résultats sont supérieurs à ceux obtenus avec le citron seul sur les morceaux de carottes (Sengun et Karapinar, 2004).

La combinaison de plusieurs acides organiques s'avère plus efficace que l'utilisation d'un acide seul, mais l'utilisation de différentes techniques de désinfection peut s'avérer aussi intéressante. En effet, un traitement combiné d'ozone avec des acides organiques (citrique, lactique et acétique) a permis une efficacité plus grande que le traitement à l'ozone seul sur les bactéries *E. coli* et *L. monocytogenes* sur les champignons enoki (Yuk et al., 2007). Avec le traitement à l'ozone seul, moins de 1 log de bactéries ont été réduites, indépendamment de la concentration en ozone et du temps de traitement. Dans le cas où l'ozone a été combiné à 1 % d'acide citrique, la réduction observée est de 2.26 log en 5 minutes de traitement.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Matériels et préparation des expériences

L'eau utilisée dans cette étude consistait à un affluent provenant de la station d'épuration La prairie sur la rive sud de Montréal. Elle a été récupérée dans un bidon de 5 L et stockée au réfrigérateur à 4°C. Les échantillons d'eau ont été prélevés sur plusieurs jours. Quant au jus de citron, il provenait de citrons jaunes et biologiques et le jus pressé a été conservé au réfrigérateur à 4°C. Le tableau 2.1 récapitule la quantité de jus de citron utilisée et l'équivalence en concentration d'acide citrique. Dans les calculs, un litre de jus de citron contient en moyenne 16 g d'acide citrique (Goetz, 2014). Les expériences ont été réalisées avec un volume d'eau usée de 10 mL. Pour faciliter la compréhension, les figures présentant les résultats obtenus seront représentées avec la concentration en acide citrique et non le volume de jus de citron. Le pH de la solution eau usée + jus de citron a été mesuré au pH-mètre et a varié de 3.0 à 3.3.

Tableau 2.1 Concentration en acide citrique à partir
du volume en jus de citron

Volume en jus de citron (mL)	Concentration en acide citrique (g/L)
1.5	2.1
2.0	3.1
3.0	3.7
4.0	4.6

2.2 Expérimentation

Toutes les expériences ont été réalisées en triplicata, avec des solutions témoins et à température ambiante de laboratoire (21- 23°C). Après la dilution qui permettait une énumération adéquate des bactéries, chaque solution a été filtrée et mis à l'étude à 44.5°C pendant 24 h.

Pour mettre en évidence la vitesse de réaction dans le temps, chaque bécher contenait un volume précis en jus de citron. Un prélèvement de 0.5 mL a été fait toutes les 5 à 10 minutes et dilué dans un ballon jaugé de 100 mL.

L'expérience sur l'effet du proton H^+ a permis de mettre en évidence le mécanisme d'action du citron sur le microorganisme. Une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 à 0,02 M avec un pH de 3 a été introduite dans un bécher contenant de l'eau usée. Toujours en comparaison avec la solution sans jus de citron qui servait de témoin, des prélèvements de 0,5 mL ont été faits toutes les 10 minutes, puis dilués dans un ballon jaugé de 100 mL.

L'effet de l'irradiation UV sur la survie des microorganismes a été mis en évidence de deux manières. Dans un premier temps, la solution a été mise au noir et les béchers ont été recouverts de papier aluminium. Ensuite, les béchers contenant l'eau usée et le jus de citron, ainsi que le bécher sans jus de citron ont été placés sous une lampe UV. Des prélèvements de 0.5 mL ont été faits au cours du temps et dilués dans un ballon jaugé de 100 mL.

Le tableau 2.2 présente le matériel et la méthode d'analyse utilisé.

Tableau 2.2 Matériels et méthode d'analyse

Paramètre	Méthode d'analyse	Matériels
<i>Escherichia Coli</i>	Filtration sur membrane (Standard Methods-9222D)	- Banc de filtration Manostat Varistalic Pump S - Système de filtration millipore 47 mm - Milieu de culture gélosé m-FC 1% acide rosolique - Membrane Whatman (porosité 0,45 µm et D=47 mm) - Boîtes de pétri D=47 mm - Incubateur Z-sciences à 44,5°C
UV	-	Cabinet d'air ESCO Airstream class II.
pH-mètre		OAKTON-pH/CON 510 series

2.3 Analyse

Le nombre de bactéries a été calculé en faisant la moyenne géométrique du triplicata des colonies obtenues, et est exprimée en unité formatrice de colonies (UFC). Les résultats obtenus ont été compilés et analysés.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

3.1 Teneur en acide citrique

Un citronnier de variété Eurêka, variété la plus commune en supermarché, produit en moyenne 45 kg de citrons par an (GardenBreizh, 2010). Un citron pèse 110 g d'après les pesées de laboratoire durant l'étude et donne environ 50 mL de jus. On peut donc calculer qu'un citronnier donnerait 21 L de jus de citron par année.

La contenance en acide citrique d'un citron dépend de plusieurs facteurs, mais ici, une valeur moyenne de 16 g d'acide citrique par litre de jus (Goetz, 2014) a été considérée lors de la présente étude. On peut en déduire par calcul qu'un arbre produirait 336 g d'acide citrique.

3.2 Effet de la concentration en jus de citron

L'inactivation des bactéries au cours du temps en fonction de la concentration en acide citrique contenue dans l'eau traitée est représentée à la figure 3.1. Dans le cas des témoins (sans ajout de jus), le nombre de bactéries présentes dans l'eau usée reste quasiment constant dans le temps. Avec la présence de jus de citron, l'inactivation a lieu. Ainsi, aux environs de 50 minutes de temps de contact et avec une concentration en acide citrique de 2.1 g/L, 1.8 log de bactéries ont été inactivés. En présence de 3.1 g/L d'acide citrique, la réduction est de 3 log au bout de 50 minutes de contact. La réduction atteint 2 log avec 3.7 g/L d'acide citrique et 5 log avec 4.6 g/L. Aussi, avec 2.1 g/L, il faut 16 min pour obtenir une réduction de 1 log, alors qu'il en faut moins de 2 min pour les concentrations supérieures. Hormis l'anomalie observée à 3.1g/L, l'inactivation se fait plus rapidement avec l'augmentation de la concentration en acide citrique.

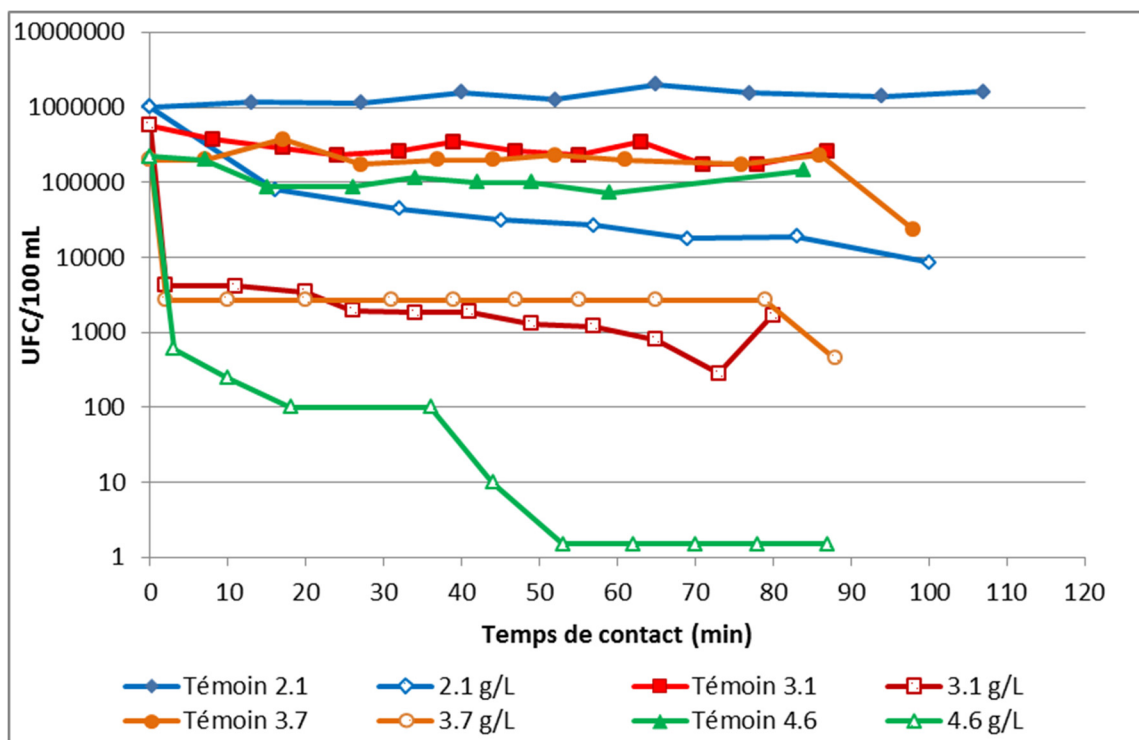


Figure 3.1 Effet de la concentration en acide citrique sur l'inactivation de *E. coli*

Le tableau 3.1 représente la valeur des constantes de vitesse en fonction des concentrations en acide citrique. Il montre que les pentes obtenues augmentent avec la concentration en acide citrique, ce qui confirme que la vitesse d'inactivation augmente avec l'augmentation de la concentration en acide citrique.

Tableau 3.1 Valeur des constantes de vitesse

Concentration en acide citrique (g/L)	Pente ($\text{mL} \cdot \text{bact}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)
2.1	-6598
3.1	-3199
3.7	-1053
4.6	-982

3.3 Influence de la concentration initiale en bactéries

Deux eaux usées différentes ont été utilisées dans le but d'étudier la différence de comportement. La figure 3.2 présente les résultats obtenus à une concentration d'acide citrique de 2.1 g/L, pour les deux eaux usées en comparaison avec le témoin sans ajout de jus de citron.

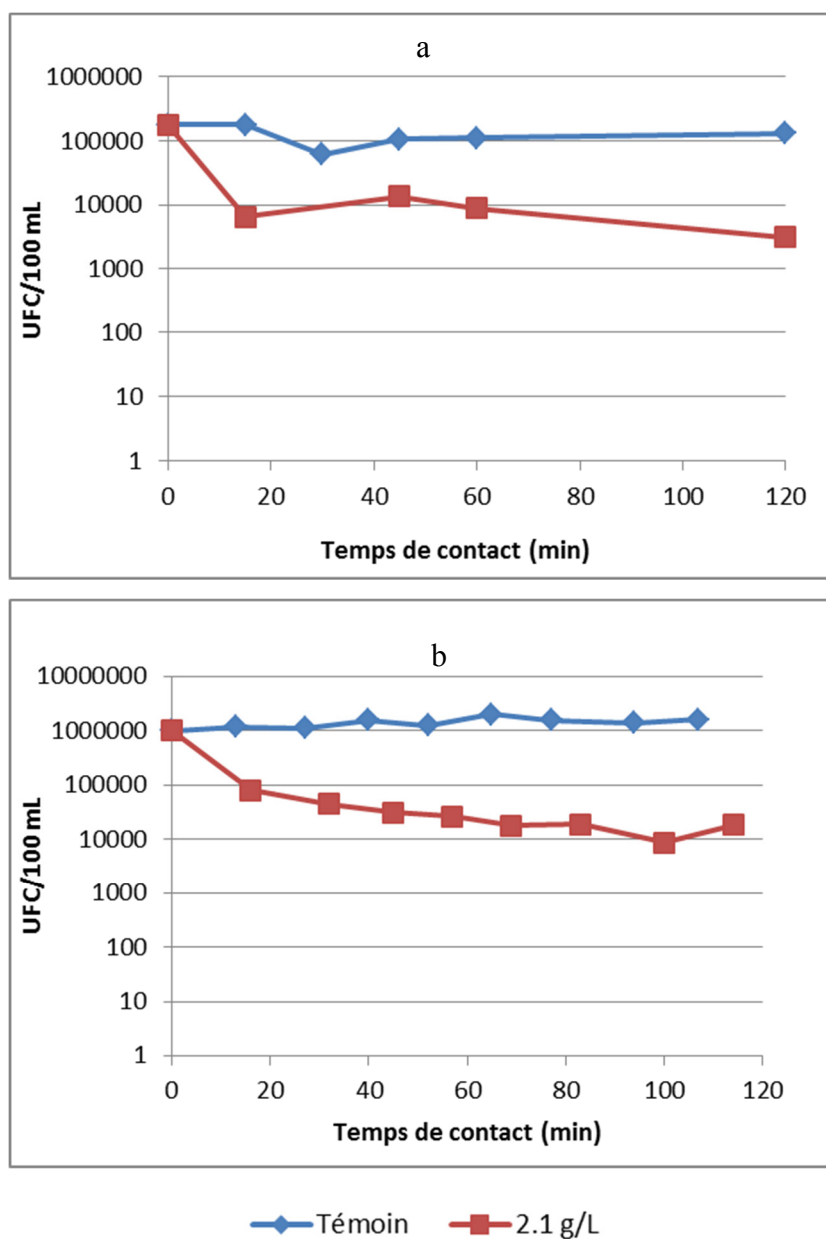
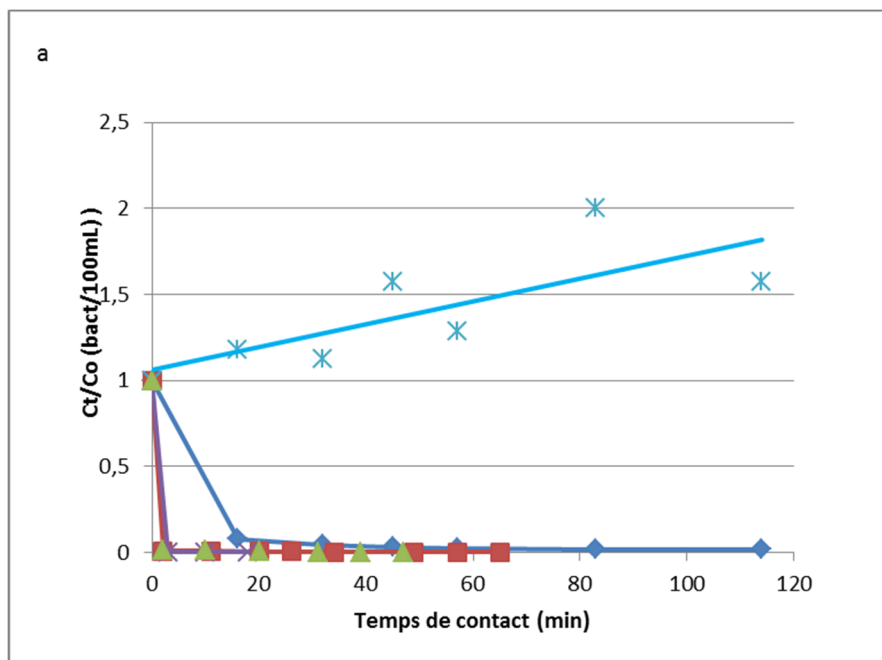


Figure 3.2 Comparaison de l'effet de l'ajout d'acide citrique sur deux eaux différentes

La figure 3.2 b montre que le nombre de bactéries initial est près de 10 fois supérieures que celui de la figure 3.2 a. Les courbes obtenues montrent que le comportement des bactéries suit la même tendance au cours du temps. Sans présence de citron, le nombre de bactérie reste constant, mais diminue dans le temps en présence de 2.1 g/L d'acide citrique. À la figure 3.2 a, il faut 15 minutes pour obtenir 1.3 log de réduction comparativement à 16 minutes pour 1 log de réduction à la figure 3.2 b. Il semblerait que l'inactivation tende à être plus rapide avec une concentration en bactérie moindre.

3.4 Ordre de réaction

Les trois graphiques d'ordre 0, 1 et 2 présentés à la figure 3.3 permettent de déterminer l'ordre de la réaction d'inactivation. D'après ces graphiques, l'ordre 2 est le plus linéaire. Il semblerait donc que cette réaction soit d'ordre 2, qui est une réaction qui impliquerait plusieurs éléments chimiques ou plusieurs paramètres. Les constantes de vitesse k peuvent donc être déterminées, et sont présentées au tableau 3.2.



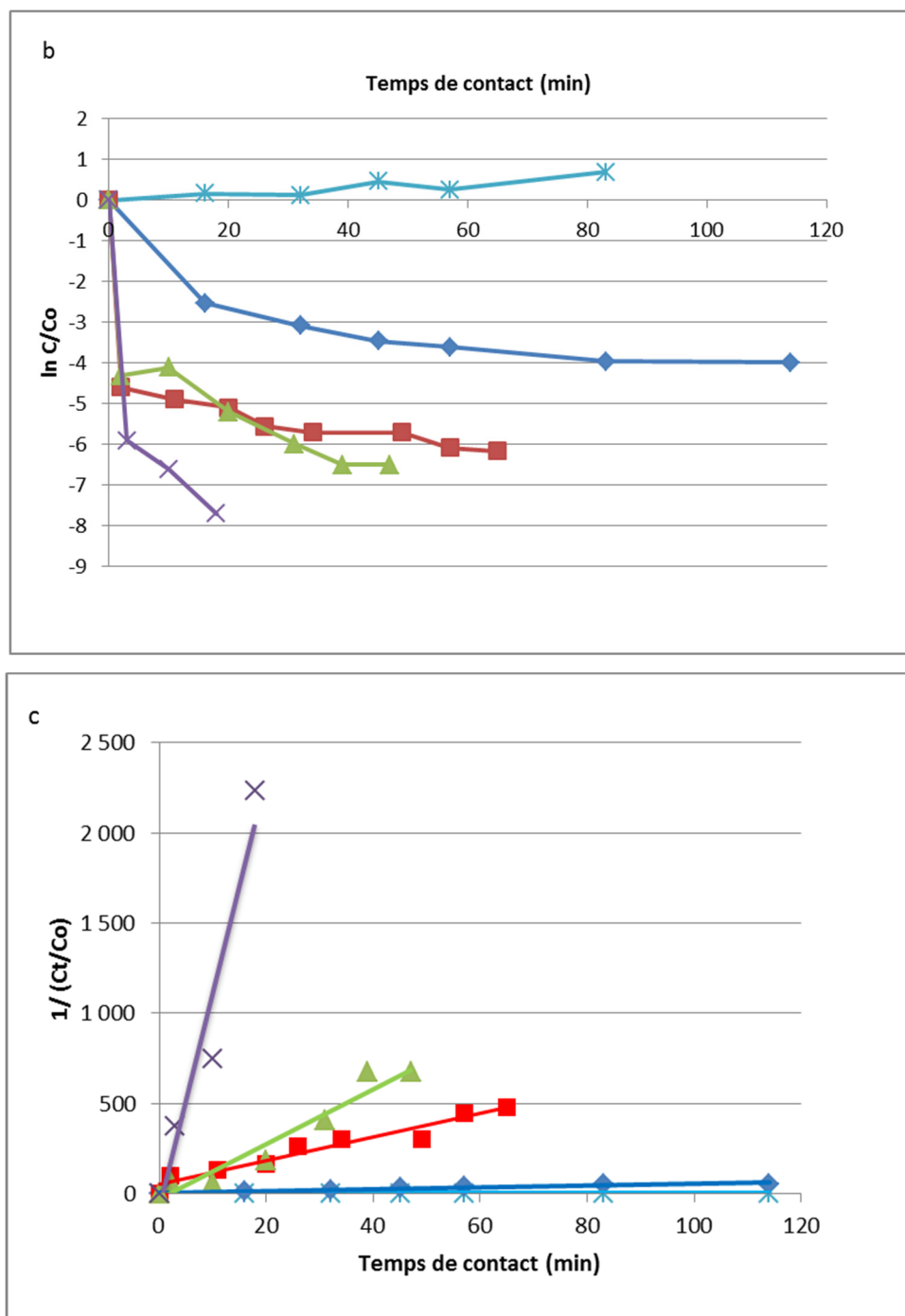


Figure 3.3 Détermination de l'ordre de la cinétique de réaction

a : ordre 0 b : ordre 1 c : ordre 2

—*— Témoins —◆— 2.1 g/L —■— 3.1 g/L —▲— 3.7 g/L —×— 4.6 g/L

Tableau 3.2 Constantes de vitesse et coefficient de corrélation de l'ordre 2

Ordre 2

Concentration acide citrique (g/L)	Constante de vitesse (mL·bact ⁻¹ ·min ⁻¹)	Coefficient de corrélation R ²
0.0	0.0036	0.657
2.1	0.493	0.937
3.1	6.49	0.941
3.7	15.2	0.935
4.6	118	0.937

Les valeurs obtenues indiquent que plus la concentration en acide citrique augmente, plus les constantes de vitesse également. Autrement dit, la vitesse de la réaction augmente avec la concentration en acide citrique.

L'équation de la réaction d'inactivation représentative de l'ordre 2 est la suivante:

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_o} + kt$$

Avec :

C_t la concentration en bactéries à un temps t ;

C_o la concentration initiale en bactéries;

k la constante de vitesse.

3.5 Effet du proton H⁺

L'étude de l'effet du proton H⁺ sur l'inactivation de la bactérie a permis de mettre en évidence le mécanisme mis en jeu. Ainsi, les graphiques représentant l'évolution des bactéries avec et sans jus de citron (témoin) et avec l'acide sulfurique sont présentées à la figure 3.4.

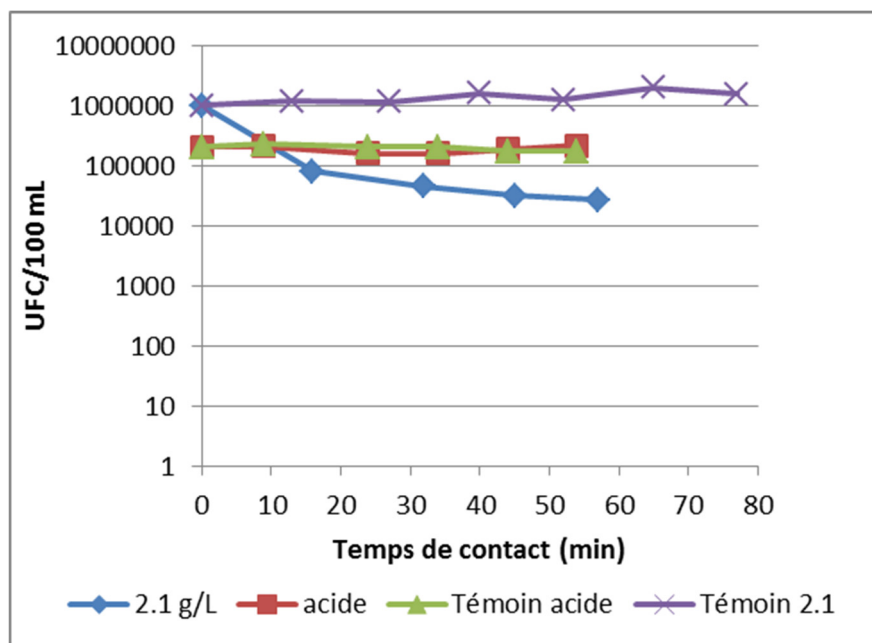


Figure 3.4 Effet du proton sur *E. coli* à température ambiante

Les résultats obtenus montrent que dans le laps de temps étudié, la présence d'acide sulfurique n'affecte pas la quantité de bactéries présentes dans l'eau; sa constante de vitesse est sensiblement la même à celle de la réaction sans ajout de jus de citron. Étant donné que les réactions ont été faites au même pH de 3, il est possible de conclure que c'est la molécule d'acide citrique qui agit sur l'inactivation de la bactérie et non le pH.

3.6 Influence de l'irradiation UV avec et sans acide citrique

L'objectif de cette partie est de mettre en évidence l'influence de l'irradiation UV sur l'inactivation de la bactérie. La figure 3.5 met en évidence l'inactivation de la bactérie en présence ou absence de rayonnement UV.

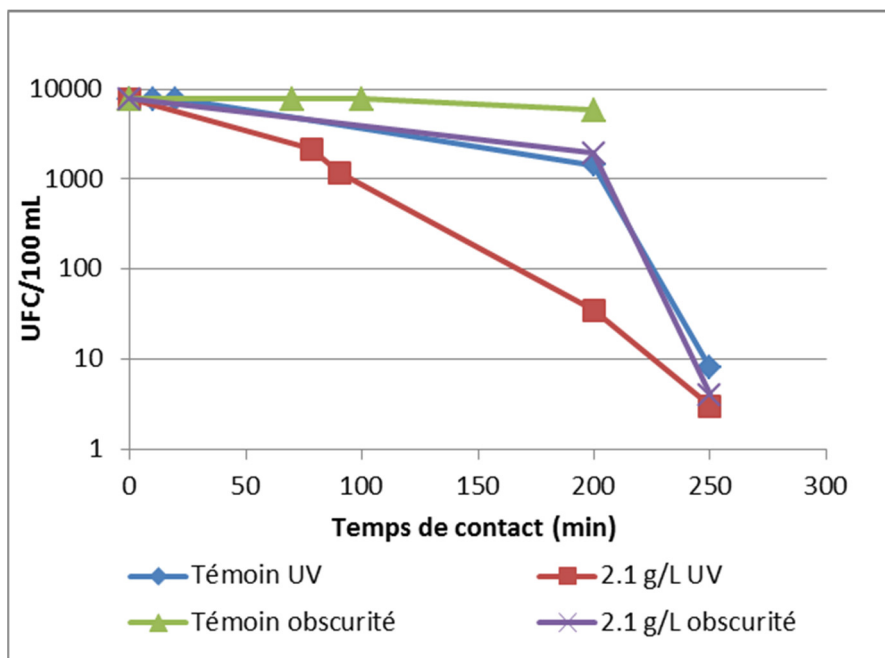


Figure 3.5 Inactivation de la bactérie *E. coli* sous UV et sous obscurité

La figure montre qu'à l'obscurité, l'inactivation est plus lente. Au bout de 200 minutes, le nombre de bactéries initial à l'obscurité est resté quasiment constante, alors que sous irradiation UV, même sans présence de jus de citron, les bactéries sont réduites de 1 log. En présence de jus de citron, la réaction se fait plus rapidement sous irradiation UV qu'à l'obscurité, ce qui est logique puisqu'il est reconnu que la longueur d'onde UV du soleil peut détruire les microorganismes (Chun et al., 2010; Severin et Suidan, 1985; Wong, Linton et Gerrard, 1998).

Ces résultats permettent de conclure sur l'importance de l'irradiation UV dans la désinfection des bactéries *E. coli* au jus de citron. La vitesse de réaction est plus rapide sous l'influence d'une irradiation UV et les bactéries survivent mieux dans l'obscurité. Ces résultats sont confirmés par plusieurs auteurs qui montrent que la lumière influence les constantes de vitesse de la réaction d'inactivation (Barcina et al., 1989; Fujioka et al., 1981; Gourmelon, 1995), et que les bactéries survivent mieux et résistent davantage à l'obscurité qu'à la lumière.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Dans cette étude, l'activité antibactérienne du jus de citron sur la bactérie *E. coli* a été mise en évidence à travers divers essais. L'inactivation se fait rapidement aux fortes concentrations en acide citrique alors qu'à une concentration plus faible de 2.1 g/L, elle est plus lente. D'ailleurs, on a pu observer en comparant deux eaux avec une concentration initiale en bactéries différentes, mais ayant la même quantité en jus de citron, que la réaction tend à se produire plus rapidement lorsque la concentration initiale en bactérie est plus faible. Probablement qu'avec une eau moins contaminée, les bactéries seront éliminées en quelques minutes, à condition de mettre suffisamment de jus de citron. Il faut noter que les communautés isolées des pays en voie de développement ont accès à des eaux de surface non traitées. Le nombre de coliformes retrouvés dans ces eaux est probablement moins important que celles retrouvées dans une eau brute d'une station d'épuration comme celle utilisée dans la présente étude.

Avec 4.6 g/L d'acide citrique, l'analyse a démontré il n'y a plus de bactéries dans l'échantillon d'eau au bout de 45 minutes de traitement. Les normes sur l'eau potable exigent justement une absence de coliformes après le traitement de l'eau destinée à la consommation. L'utilisation du jus de citron ou de l'acide citrique comme désinfectant de l'eau pourrait donc être envisageable.

La détermination de l'ordre 2 de la réaction indique qu'au minimum deux paramètres influent sur la réaction d'inactivation, la concentration initiale en bactéries ainsi que la concentration en acide citrique. La complexité du mécanisme de traitement proposé pourrait également être à l'origine de l'ordre 2 observé. En effet, la première étape du mécanisme est la pénétration de la molécule d'acide citrique non dissociée dans la cellule, suivie de sa dissociation à l'intérieur de celle-ci. Comme c'est la partie indissociée de la molécule qui est cytotoxique et lipophile, elle est responsable de la mort ou l'inhibition de la cellule. Contrairement aux acides faibles,

les acides forts se dissocient rapidement et n'ont pas le temps de rentrer dans la cellule. Cela explique l'absence d'inactivation dans le traitement avec l'acide sulfurique dans la section 3.5. A travers l'équation de la réaction d'inactivation de l'ordre 2 obtenue dans la section 3.4, à une concentration en acide citrique donnée, il est possible de déterminer le temps requis pour avoir un enlèvement des coliformes. A partir de là, en fonction de la situation, une adaptation peut se faire. En fonction du temps de traitement voulu, l'équation permet de déterminer la quantité d'acide citrique ou de jus de citron à introduire dans l'eau à traiter pour atteindre le taux d'inactivation recherché. Dans le cas où il n'y a qu'une certaine quantité de jus de citron à disposition, le temps que la réaction prendra pour obtenir l'enlèvement souhaité peut également être connu.

La consommation d'eau varie énormément d'une région à l'autre du globe et est aussi variable selon les sources d'informations. Toutefois, selon l'OMS (2013) et le Centre d'information sur l'eau (2013) en Afrique Sub-Saharienne, la consommation d'eau serait de 10 litres par personne par jour pour répondre aux besoins fondamentaux d'hydratation et d'alimentation. Cela correspond à 3650 litres d'eau par personne par an. Pour répondre à ce besoin, il faudrait 70 arbres par personne. Ce nombre est assez important, surtout si on pense à l'implantation d'un tel projet dans un village et à la superficie de terres nécessaire pour l'implantation de ces arbres. Néanmoins, étant donné que les analyses ont été réalisées sur une eau brute fortement concentrée en coliformes, la mise en application de cette technologie devrait nécessiter moins de citronniers. Cette méthode de désinfection pourrait aussi être en complémentarité avec d'autres techniques. Un filtrage de l'eau au préalable pourrait réduire le nombre de bactéries présentes dans l'eau, et permettrait ainsi d'utiliser moins de citrons pour la désinfection. Comme l'efficacité des acides organiques a été démontrée, une combinaison de plusieurs acides organiques en fonction des disponibilités de la région pourrait s'avérer efficace. L'acide citrique est une molécule présente dans d'autres fruits, qui sont ainsi susceptibles d'avoir les mêmes propriétés antimicrobiennes que le jus de citron. Pour exemple, les propriétés antimicrobiennes de l'orange ont été démontré (Chakraborty, Chandran et Bhat, 2015). Aussi, la synergie de l'acide acétique contenu dans le vinaigre avec l'acide citrique a donné de bons

résultats (Sengun et Karapinar, 2004). Une opportunité s'ouvre ainsi quant à l'utilisation d'autres produits dépendamment des ressources locales.

Les résultats obtenus lors des essais sous l'obscurité et la lampe UV impliquent qu'une désinfection combinée au soleil pourrait s'avérer efficace. En effet, bien qu'efficace dans plusieurs pays, la méthode SODIS reste discutable en cas de ciel nuageux. Il serait donc intéressant dans une situation pareille d'inclure une quantité adaptée de jus de citron dans l'eau à désinfecter pour assurer la sécurité des consommateurs.

Aussi, l'association de l'acide citrique avec un moyen de traitement plus conventionnel comme l'ozone a été efficace sur l'inactivation des bactéries. Ces combinaisons ouvrent la voie à des possibilités de traitement combinés plus efficaces que s'ils étaient utilisés seuls.

L'utilisation de techniques alternatives de traitement répond à un besoin environnementale et de santé publique et rentre surtout dans une dynamique d'accessibilité aux pays en développement. Ainsi, pour mettre en place une technologie de désinfection de l'eau avec du jus de citron deux techniques d'utilisation pourraient être proposées. Une technique centralisée dans un endroit stratégique d'un village par exemple. Un dispositif serait mis en place, en prenant soin d'utiliser un contenant laissant passer la lumière. Une meilleure solution serait d'avoir une technique décentralisée, donc chez l'utilisateur. Selon le type d'eau utilisée, les foyers recevraient une seringue contenant la quantité adéquate de jus de citron à introduire dans une bouteille d'eau laissant passer la lumière. La mise en pratique de ce système pourrait non seulement générer des emplois, mais ce système apporterait également une dimension pédagogique aux communautés concernées. Il permet en effet une transmission et une amélioration de la connaissance, en participant à l'éducation et à la formation des communautés.

CONCLUSION

L'accès à l'eau potable étant encore une problématique dans plusieurs régions du monde, des moyens de traitement efficaces, à moindre coût et respectueux de l'environnement sont de plus en plus recherchés. Plusieurs produits naturels ont démontré leur efficacité en tant qu'agent antibactérien, principalement les fruits comme les agrumes.

L'objectif de la présente étude était de déterminer l'efficacité du jus de citron (acide citrique) comme désinfectant naturel en vue de potabiliser une eau. Des séries d'essais en laboratoire ont ainsi été réalisés en bécher suivant différentes concentrations d'acide citrique sur un affluent d'eau usée. Les résultats obtenus ont été analysés et ont permis de conclure sur le potentiel pouvoir désinfectant du jus de citron sur la bactérie *E. coli* dans l'eau.

Les analyses démontrent que le jus de citron présente de bonnes propriétés antibactériennes contre la bactérie *E. coli*. La vitesse de la réaction d'inactivation est de l'ordre 2 par rapport au temps de contact, ce qui implique qu'un minimum de deux facteurs influe sur l'inactivation. Les résultats obtenus permettent de conclure que les rayons UV sont un facteur influençant l'inactivation de la bactérie. La désinfection de l'eau par les rayons du soleil dans les pays à climat chaud augmente l'intérêt pour cette technologie. Cela ouvre des perspectives sur l'étude des combinaisons de traitement afin d'en réduire les proportions d'utilisation du jus de citron et augmenter en efficacité.

L'étude du mécanisme de la réaction d'inactivation avec le jus de citron indique que l'action désinfectante est apportée par la molécule de citrate et non uniquement par le pH acide du milieu.

L'applicabilité de cette technique pourrait être limitée par la disponibilité du citron. Des perspectives s'ouvrent telles que l'utilisation des pépins de citron qui peuvent avoir des propriétés anti bactéricides. Néanmoins, ces derniers sont liés à la présence du cyanure qui est

une toxine dont les effets toxiques sont connus. A cette alternative s'ajoute l'utilisation du zeste du citron qui contient de l'huile essentielle dont les propriétés anti bactéricides ont été démontrées. Une vérification du seuil de toxicité de ces produits pour l'homme sera nécessaire.

Il est évident que des essais pilotes à grande échelle permettraient d'évaluer l'efficacité du jus de citron sur la bactérie *E. coli* dans l'eau dans des conditions réelles, mais cette technologie reste un moyen peu coûteux et intéressant pour diminuer la vulnérabilité des populations en voie de développement.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abia, Akebe Luther King, Eunice Ubomba-Jaswa et Maggy Ndombo Benteke Momba. 2016. « Occurrence of diarrhoeagenic *Escherichia coli* virulence genes in water and bed sediments of a river used by communities in Gauteng, South Africa ». *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1-10.
- Acra, Aftim, Yester Karahagopian, Zeina Raffoul et Rashid Dajani. 1980. « Disinfection of oral rehydration solutions by sunlight ». *The Lancet*, vol. 316, n° 8206, p. 1257-1258.
- Adour-Garonne, Agence de l'eau. 2013. « Pollution par les nitrates et le phosphore ». < [En ligne] <http://www.eau-adour-garonne.fr/fr/eau-et-activites-economiques/agriculture/les-risques-de-pollution-lies-a-l-agriculture/pollution-par-les-nitrates-et-le-phosphore.html> >. Consulté le 16 mai 2017
- Aduayi-Akue, Adoté Agbéko, et Kissao Gnandi. 2014. « Evaluation de la pollution par les métaux lourds des sols et de la variété locale du maïs *Zea mays* dans la zone de traitement des phosphates de Kpémé (Sud du Togo) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 8, n° 5, p. 2347-2355.
- Antov, Mirjana G, Marina B Šćiban et Nada J Petrović. 2010. « Proteins from common bean (*Phaseolus vulgaris*) seed as a natural coagulant for potential application in water turbidity removal ». *Bioresource technology*, vol. 101, n° 7, p. 2167-2172.
- Barcina, Isabel, Juan M González, Juan Iriberry et L Egea. 1989. « Effect of visible light on progressive dormancy of *Escherichia coli* cells during the survival process in natural fresh water ». *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 55, n° 1, p. 246-251.
- Bermúdez-Aguirre, Daniela, et Gustavo V Barbosa-Cánovas. 2013. « Disinfection of selected vegetables under nonthermal treatments: chlorine, acid citric, ultraviolet light and ozone ». *Food Control*, vol. 29, n° 1, p. 82-90.
- Chakraborty, Anwasha, Anu Chandran et Gopalkrishna K Bhat. 2015. « Does Citrus Fruit Juice Have Antibacterial Effect Against Enteric Pathogenic Bacteria? ». *Indian Journal of Applied Research*, vol. 5, n° 5, p. 19-21.
- Chen, Jie, Hao Wu et Hui Qian. 2016. « Groundwater Nitrate Contamination and Associated Health Risk for the Rural Communities in an Agricultural Area of Ningxia, Northwest China ». *Exposure and Health*, vol. 8, n° 3, p. 349-359.

- Chun, HH, JY Kim, BD Lee, DJ Yu et KB Song. 2010. « Effect of UV-C irradiation on the inactivation of inoculated pathogens and quality of chicken breasts during storage ». *Food Control*, vol. 21, n° 3, p. 276-280.
- Cossec, Chloé Le, Anne-Marie Laurent, Alain Person, Isabelle Rouvié-Laurie et Claude Beaubestre. 2016. « Teneurs en trichloramine et trihalométhanes dans l'air ou l'eau des piscines publiques parisiennes et impact de différents procédés de traitement de l'eau des bassins ». 2268-3798.
- CPEPESC. 2014. « Les différents paramètres physiques et chimiques des eaux ». < [En ligne] <http://www.cpepesc.org/Les-principaux-parametres.html> >. Consulté le 24 juin 2017.
- Croxen, Matthew A, Robyn J Law, Roland Scholz, Kristie M Keeney, Marta Wlodarska et B Brett Finlay. 2013. « Recent advances in understanding enteric pathogenic *Escherichia coli* ». *Clinical microbiology reviews*, vol. 26, n° 4, p. 822-880.
- DGS. 2005. *La qualité de l'eau potable en France* <[En ligne] http://social-sante.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_presse-3.pdf >.
- Diaz, A, N Rincon, A Escorihuela, N Fernandez, E Chacin et CF Forster. 1999. « A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela ». *Process Biochemistry*, vol. 35, n° 3, p. 391-395.
- Dyck, Roberta, Geneviève Cool, Manuel Rodriguez et Rehan Sadiq. 2015. « Treatment, residual chlorine and season as factors affecting variability of trihalomethanes in small drinking water systems ». *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, vol. 9, n° 1, p. 171-179.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). 2012. *Drinking water standards and health advisories*.
< <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100N01H.PDF?Dockey=P100N01H.PDF> >.
- Espina, Laura, María Somolinos, Abdenour Ait Ouazzou, Santiago Condón, Diego García-Gonzalo et Rafael Pagán. 2012. « Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 in fruit juices by combined treatments of citrus fruit essential oils and heat ». *International Journal of Food Microbiology*, vol. 159, n° 1, p. 9-16.
- Fatombi, K, Roger Gérard Josse, Daouda Mama et Taofiki Aminou. 2009. « Étude de l'activité floculante de la caséine acide extraite de la crème de cocos nucifera dans la clarification des eaux de surface ». *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, vol. 22, n° 1, p. 93-101.
- Folkard, G, et J Sutherland. 2002. « Development of a naturally derived coagulant for water and wastewater treatment ». *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 2, n° 5-6, p. 89-94.

- Fujioka, Roger S, Harlan H Hashimoto, Edward B Siwak et Reginald H Young. 1981. « Effect of sunlight on survival of indicator bacteria in seawater ». *Applied and environmental microbiology*, vol. 41, n° 3, p. 690-696.
- Futhazar, Alexandre. 2014. « Adaptation du bacillus au stress acide ». Mémoire Université de Rennes 1 24 p.
- GardenBreizh. 2010. « Quelle récolte moyenne pour un citronnier ». < [En ligne] <http://gardenbreizh.org/forum/viewtopic-28692-3-quelle-recolte-moyenne-en-kg-pour-un-citronnier.html> >. Consulté le 14 mai 2017.
- Gassenschmidt, Ursula, Klaus D Jany, Tauscher Bernhard et Heinz Niebergall. 1995. « Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam ». *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, vol. 1243, n° 3, p. 477-481.
- Gbedenu, Koffi Dotse. 2013. « Potabilisation de l'eau par chloration ». p. 58.
- Ghebremichael, Kebeab A, KR Gunaratna, Hongbin Henriksson, Harry Brumer et Gunnel Dalhammar. 2005. « A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed ». *Water research*, vol. 39, n° 11, p. 2338-2344.
- Goetz, P. 2014. « Citrus limon (L.) Burm. f. (Rutacées) citronnier ». *Phytothérapie*, vol. 12, n° 2, p. 116-121.
- González-Molina, E, R Domínguez-Perles, DA Moreno et C García-Viguera. 2010. « Natural bioactive compounds of Citrus limon for food and health ». *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, vol. 51, n° 2, p. 327-345.
- Gourmelon, Michèle. 1995. « Étude de la lumière visible comme facteur limitant de la survie de *Escherichia coli* en milieu marin ». Université de Rennes.
- Gruau, Gérard. 2004. « Les sous-produits chlorés dans les eaux destinées à l'alimentation humaine ». *Rapport DRASS et Région Bretagne*.
- Gu, Fu, Guo-jiang Wan et Shi-jie Wang. 2004. « A method to improve the water quality of rural drinking water-SODIS ». *Geology*, vol. 2, p. 018.
- Guilherme, Stephanie. 2014. « Sous- produits de la désinfection dans l'eau potable des petits réseaux municipaux : variabilité spatio-temporelle, modélisation et stratégies de suivi ». 167 p.
- Helali, Sihem, Maria Inmaculada Polo-López, Pilar Fernández-Ibáñez, Bunsho Ohtani, Fumiaki Amano, Sixto Malato et Chantal Guillard. 2014. « Solar photocatalysis: A

green technology for *E. coli* contaminated water disinfection. Effect of concentration and different types of suspended catalyst ». *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 276, p. 31-40.

Howe, Kerry J, David W Hand, John C Crittenden, R Rhodes Trussell et George Tchobanoglous. 2012. *Principles of water treatment*. John Wiley & Sons, 672 p.

Huang, Yaoxin, et Haiqiang Chen. 2011. « Effect of organic acids, hydrogen peroxide and mild heat on inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 on baby spinach ». *Food Control*, vol. 22, n° 8, p. 1178-1183.

Joyce, TM, KG McGuigan, M Elmore-Meegan et RM Conroy. 1996. « Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating ». *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 62, n° 2, p. 399-402.

Kauffmann-Lacroix, Catherine, Damien Costa, Anne Bousseau et Christine Imbert. 2014. « Les champignons de l'eau: maîtrise du risque d'infection fongique lié à l'eau ». *Revue Francophone des Laboratoires*, vol. 2014, n° 459, p. 69-75.

Le centre d'information sur l'eau. 2013. « Les usages de l'eau dans le monde : les usages domestiques ». < [En ligne] <http://www.cieau.com/les-ressources-en-eau/dans-le-monde/les-usages-domestiques> >. Consulté le 14 mai 2017.

Lalitha, Ch, et V Anitha Devi. 2016. « Treatment of drinking water in rural areas by solar disinfection method ». p. 11.

Levine, Myron M, Karen L Kotloff, James P Nataro et Khitam Muhsen. 2012. « The global enteric multicenter study (GEMS): impetus, rationale, and genesis ». *Clinical infectious diseases*, vol. 55, n° suppl 4, p. S215-S224.

LMS, World Water Treatment. 2017. « Désinfection de l'eau ». < [En ligne] <http://www.lms-water.com/solutions/desinfection-de-l-eau/> >. Consulté le 14 mai 2017.

Marsal, Frédéric. 2004. « Le pH des solutions aqueuses ». < [En ligne] <http://marsal.univ-tln.fr/pHdos/Phdos2/phsolac2.html> >. Consulté le 29-06-2017.

Marzouk, Brahim. 2013. « Characterization of bioactive compounds in Tunisian bitter orange (*Citrus aurantium L.*) peel and juice and determination of their antioxidant activities ». *BioMed research international*, vol. 2013.

Mater, Nicolas. 2014. « Evaluation de l'impact (éco) toxicologique de résidus médicamenteux présents dans les effluents hospitaliers, urbains et dans l'environnement à l'aide d'une batterie de bioessais et de biomarqueurs ». Doctorat. École Doctorale Sciences

Écologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries (Toulouse); 154236330, 286 p.

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). 2017. « Règlement sur la qualité de l'eau potable ». < [En ligne] <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/parties-1-2-3.htm#3> >.

Nii, Y, K Fukuta, R Kiyokage, K Sakai et S Yamamoto. 1997. « In vitro effects of citrus fruit juices on solubilization of calcium from shirasuboshi (boiled and semi-dried whitebaits) ». *Journal of Japanese Society of Nutrition and Food Science (Japan)*.

Niu, Li-ying, Ji-hong Wu, Xiao-jun Liao, Chen Fang, Zheng-fu Wang, Guang-hua Zhao et Xiao-song Hu. 2008. « Physicochemical characteristics of orange juice samples from seven cultivars ». *Agricultural Sciences in China*, vol. 7, n° 1, p. 41-47.

Nordmark, Brittany A, Todd M Przybycien et Robert D Tilton. 2016. « Comparative coagulation performance study of *Moringa oleifera* cationic protein fractions with varying water hardness ». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, n° 4, p. 4690-4698.

Okeke, Malachy Ifeanyi, Arinze Stanley Okoli, Edith Nneka Eze, Grace Chinwe Ekwume, Evangelin Uchena Okosa et Christian Ukwuoma Iroegbu. 2015. « Antibacterial activity of *Citrus limonum* fruit juice extract ». *Pak. J. Pharm. Sci*, vol. 28, n° 5, p. 1567-1571.

Okuda, Tetsuji, Aloysius U Baes, Wataru Nishijima et Mitsumasa Okada. 2001. « Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution ». *Water research*, vol. 35, n° 2, p. 405-410.

OMS. 2011. « Directives pour la qualité de l'eau potable ». < [En ligne] http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/fr/ >. Consulté le 25 juin 2017.

OMS. 2013. « Quelle est la quantité d'eau nécessaire en situation d'urgence? ». < [En ligne] http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/09_quantite_eau_urgence.pdf?ua=1 >. Consulté le 15 mai 2017.

OMS. 2015. « Progrès en matière d'assainissement et d'alimentation en eau : les principaux faits. ». < [En ligne] http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp-2015-key-facts/fr/ >. Consulté le 24-06-2017.

OMS. 2016. « EAU-Aide mémoire N° 391 ». < [En ligne] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/fr/> >.

- OMS. 2017. « Les maladies liées à l'eau ». < [En ligne] http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/methaemoglob/fr/ >. Consulté le 24 juin 2017.
- Payment, P. 1998. « Les contaminants de l'eau et leurs effets sur la santé ». *Revue des sciences de l'eau*, vol. 11, p. 199-210.
- Payment, P., et P. Hartemann. 1998. « Health effects associated with drinking water ». *Revue des sciences de l'eau*, vol. 11, p. 199-199.
- Pfeiffer, Valentin. 2013. « Développement d'une méthode de calcul de la performance des procédés de désinfection des installations de traitement d'eau potable ». Mémoire. École Polytechnique de Montréal, 112 p.
- Rodier, Jean, et Bernard Legube. 2009. *L'analyse de l'eau*. Dunod, 1526 p.
- Sadiq, Rehan, et Manuel J Rodriguez. 2004. « Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review ». *Science of the Total Environment*, vol. 321, n° 1, p. 21-46.
- Sainte-Rose. 2003. « Les usines de production d'eau potable de Laval ». < [En ligne] <https://www.laval.ca/Documents/Pages/Fr/Citoyens/environnement-recyclage-et-collectes/usines-eau-potable.pdf> >. Consulté le 25-06-2017.
- Šćiban, Marina, Mile Klačnja, Mirjana Antov et Biljana Škrbić. 2009. « Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn ». *Bioresource technology*, vol. 100, n° 24, p. 6639-6643.
- Sengun, Ilkin Yucel, et Mehmet Karapinar. 2004. « Effectiveness of lemon juice, vinegar and their mixture in the elimination of *Salmonella typhimurium* on carrots (*Daucus carota* L.) ». *International journal of food microbiology*, vol. 96, n° 3, p. 301-305.
- Severin, BF, et MT Suidan. 1985. « Ultraviolet disinfection for municipal wastewater ». *Chemical engineering progress*, vol. 81, n° 4, p. 37-44.
- Shah, Amisha D, Zheng-Qian Liu, Elisabeth Salhi, Thomas Höfer, Barbara Werschkun et Urs Von Gunten. 2015. « Formation of disinfection by-products during ballast water treatment with ozone, chlorine, and peracetic acid: influence of water quality parameters ». *Environmental Science: Water Research & Technology*, vol. 1, n° 4, p. 465-480.
- Soumia, Nekhai. 2013. « Etude et simulation numérique d'un réacteur UV pour la désinfection de l'eau contaminée ». Mémoire. Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran, 71 p.

- Sutherland, Folkard et Grant. 1990. « Natural coagulants for appropriate water treatment: a novel approach ». *Waterlines*, vol. 8, n° 4, p. 30-32.
- Tomotake, Hiroyuki, Tetsuro Koga, Masayuki Yamato, Afework Kassu et Fusao OTA. 2006. « Antibacterial activity of citrus fruit juices against *Vibrio* species ». *Journal of nutritional science and vitaminology*, vol. 52, n° 2, p. 157-160.
- Tondera, Katharina, Kassandra Klaer, Silke Roder, Ira Brueckner et Johannes Pinnekamp. 2016. « Amélioration de la qualité microbiologique des eaux de surface dans un bassin versant, dans une zone densément peuplée: scénario des coûts et effets ». *Pollution des rejets urbains de temps de pluie/Pollution of wet weather flow-Contrôle à la source/Source control*, p. 6.
- Violeta, Nour, Ion Trandafir et Mira Elena Ionica. 2010. « HPLC organic acid analysis in different citrus juices under reversed phase conditions ». *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, vol. 38, n° 1, p. 44.
- Wallet, France, Corinne Emery, Emmanuel Briand et Pierre-André Cabanes. 2016. « Prévalence de *Legionella* dans les installations de production et de distribution d'eau chaude sanitaire ». *Environnement, Risques & Santé*, vol. 15, n° 1, p. 29-38.
- Wegelin, Martin, et Bernhard Sommer. 1998. « Solar Water Disinfection (SODIS)—destined for worldwide use? ». *Waterlines*, vol. 16, n° 3, p. 30-32.
- Winward, Gideon P, Lisa M Avery, Tom Stephenson et Bruce Jefferson. 2008. « Essential oils for the disinfection of grey water ». *Water research*, vol. 42, n° 8, p. 2260-2268.
- Wong, E, RH Linton et DE Gerrard. 1998. « Reduction of *Escherichia coli* and *Salmonella* senftenbergon pork skin and pork muscle using ultraviolet light ». *Food Microbiology*, vol. 15, n° 4, p. 415-423.
- Wu, Donghai, Guanghua Lu, Ran Zhang, Hong You, Zhenhua Yan et Yi Li. 2016. « Disinfection characteristics of the combined ultraviolet radiation and ozone process using *Escherichia coli* as a probe ». *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 16, n° 1, p. 163-170.
- Yang, Jian, Delores Lee, Shayna Afaisen et Rama Gadi. 2013. « Inactivation by lemon juice of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella Enteritidis*, and *Listeria monocytogenes* in beef marinating for the ethnic food kelaguen ». *International journal of food microbiology*, vol. 160, n° 3, p. 353-359.
- Yin, Chun-Yang. 2010. « Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment ». *Process Biochemistry*, vol. 45, n° 9, p. 1437-1444.

Yuk, Hyun-Gyun, Mee-Young Yoo, Jae-Won Yoon, Douglas L Marshall et Deog-Hwan Oh. 2007. « Effect of combined ozone and organic acid treatment for control of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* on enoki mushroom ». *Food Control*, vol. 18, n° 5, p. 548-553.

