



**Évaluation de l'innocuité des réacteurs équipés de
lampes à rayonnements ultraviolets et de l'efficacité
de ces procédés pour la désinfection des eaux
destinées à la consommation humaine**

Rapport et Lignes directrices

novembre 2010
(saisine 2009-SA-0002)

Avant-propos

Sur proposition du Comité d'Experts Spécialisé « Eaux » (CES « Eaux »), l'Afssa s'est autosaisie le 8 janvier 2009 en vue d'élaborer des lignes directrices pour l'évaluation de l'innocuité des réacteurs équipés de lampes à rayonnements ultraviolets (UV) et de l'efficacité de ces procédés pour le traitement d'eaux destinées à la consommation humaine (saisine n°2009-SA-0002).

A la lumière de l'expérience acquise depuis les années 1980 sur ces procédés de traitement, l'Afssa a souhaité actualiser les préconisations relatives aux lampes à vapeur de mercure à basse pression et en proposer de nouvelles pour les lampes à vapeur de mercure à moyenne pression apparues plus récemment.

Un groupe de travail a été créé à cet effet par décision du directeur général de l'Afssa du 9 janvier 2009.

Les présentes lignes directrices élaborées à l'attention des experts, des industriels concernés visent à préciser les modalités de l'évaluation de l'innocuité et de l'efficacité des réacteurs UV et leurs conditions d'utilisation.

Une rencontre avec les professionnels responsables de la mise sur le marché français des réacteurs UV a été organisée au début du mandat du groupe de travail afin de recueillir des précisions sur les pratiques actuelles et sur les difficultés éventuellement rencontrées lors de la constitution des dossiers de demande d'autorisation. Les normes existantes dans les pays membres de l'union européenne et dans les pays tiers pour la validation des réacteurs UV utilisés pour la désinfection de l'eau destinée à la consommation humaine ont été prises en considération.

Le rapport du groupe de travail a été adopté par le CES « Eaux » lors de la séance du 6 juillet 2010.

Sommaire

INTRODUCTION	10
1 PRESENTATION ET DESCRIPTION DES PROCEDES METTANT EN ŒUVRE DES REACTEURS UV ...	11
1.1 GENERALITES SUR LES RAYONNEMENTS UV.....	11
1.2 LAMPES UTILISEES POUR LE TRAITEMENT AUX RAYONNEMENTS UV	12
1.2.1 Lampes à vapeur de mercure.....	13
1.2.2 Gainés de quartz.....	16
1.2.3 Ballasts.....	17
1.3 REACTEURS	17
1.3.1 Composantes d'un réacteur.....	17
1.3.2 Hydraulique de fonctionnement des réacteurs.....	18
1.3.3 Modélisation hydraulique.....	19
1.4 DISPOSITIFS DE CONTROLE	19
1.4.1 Radiomètres	19
1.4.2 Radiomètres de référence	21
1.4.3 Suivi de la consommation électrique de la lampe	22
2 INTERETS ET RISQUES ASSOCIES A L'UTILISATION DES PROCEDES METTANT EN ŒUVRE DES REACTEURS UV	22
2.1 MECANISMES D'ACTION	22
2.1.1 Action des rayonnements UVB et UVC sur les micro-organismes.....	22
2.1.2 Action des rayonnements UVA sur les micro-organismes	24
2.2 EFFICACITE	24
2.2.1 Cinétique d'inactivation.....	24
2.2.2 Illustration de l'efficacité	25
2.3 REACTIONS INDESIRABLES	29
2.3.1 Réactions de photolyse.....	29
2.3.2 Réparation de l'ADN.....	35
2.4 CONCLUSIONS.....	36
3 CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET NORMATIF	37
3.1 CONDITIONS DE MISE SUR LE MARCHE FRANÇAIS DES REACTEURS UV POUR LE TRAITEMENT DES EDCH.....	37
3.1.1 Réglementation applicable aux réacteurs UV.....	37
3.1.2 Historique de l'évaluation des dossiers d'autorisation de mise sur le marché de réacteurs UV.....	37
3.2 AUTRES REFERENCES REGLEMENTAIRES OU NORMATIVES	37
3.3 CONTEXTE NORMATIF.....	38
4 PREUVES D'INNOCUITE ET D'EFFICACITE	39
4.1 INNOCUITE DES PROCEDES METTANT EN ŒUVRE DES REACTEURS UV	39
4.1.1 Modélisation photonique.....	39
4.2 PREUVES D'EFFICACITE	40
4.2.1 Exigences des normes	40
4.2.2 Protocoles d'essai.....	40
5 TECHNOLOGIES EMERGENTES ET PERSPECTIVES TECHNOLOGIQUES	46
CONCLUSION	47

LIGNES DIRECTRICES

1	INNOCUITE ET EFFICACITE	49
1.1	<i>Innocuité des matériaux</i>	49
1.2	<i>Innocuité des produits d'entretien</i>	49
1.3	<i>Risque de formation de sous-produits indésirables liés à l'émission de la lampe</i>	49
1.4	<i>Risque de formation de sous-produits indésirables liés à la dose</i>	50
1.5	<i>Concernant le risque de formation de sous-produits indésirables liés à la présence de précurseurs :</i>	50
1.6	<i>Qualité de l'eau à traiter :</i>	50
1.7	<i>Efficacité de désinfection</i>	51
1.8	<i>Contrôle des conditions de fonctionnement</i>	51
1.9	<i>Durée de l'agrément</i>	51
2	PRECONISATIONS DE MISE EN ŒUVRE ET DE SUIVI	51
2.1	<i>Utilisation à domicile</i>	51
2.2	<i>Place du traitement par rayonnements UV dans la chaîne de potabilisation</i>	52
2.3	<i>Précautions de suivi</i>	52

ANNEXES

ANNEXE A : MODÉLISATIONS HYDRAULIQUES ET PHOTONIQUES	56
ANNEXE B : LES RADIOMETRES	62
ANNEXE C : LES MÉCANISMES DE PHOTORÉPARATION ET DE « DARK REPAIR »	65
ANNEXE D : CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET NORMATIF	69
ANNEXE E : LES TECHNOLOGIES EMERGENTES	79

Liste des figures

Figure 1 : Répartition des longueurs d'onde dans le domaine des ultraviolets (d'après USEPA, 2006).....	11
Figure 2 : Schémas de lampes à vapeur de mercure à basse et moyenne pressions (USEPA, 2006).....	12
Figure 3 : Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure à basse pression (DVGW W 294-1, 2006) (la raie à 184,9 nm ne figure pas sur le spectre).....	13
Figure 4 : Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure à moyenne pression (d'après OENORM, 2003).....	14
Figure 5 : Spectre de transmission d'un quartz dopé et d'un quartz non dopé (USEPA, 2006).....	17
Figure 6 : Exemple d'équipement de désinfection par rayonnements ultraviolets (USEPA, 2006).....	18
Figure 7 : Position axiale du réacteur par rapport au flux (USEPA, 2006).....	19
Figure 8 : Position perpendiculaire du réacteur par rapport au flux (USEPA, 2006).....	19
Figure 9 : Exemples de radiomètres (a. équipant un réacteur BP ; b. équipant un réacteur MP) (USEPA, 2006).....	20
Figure 10 : Critères d'idéalité d'un radiomètre. (a. Critères de linéarité / b. Réponses angulaires) (USEPA, 2006).....	20
Figure 11 : Corrélation entre la tension d'alimentation ou la puissance débitée et l'énergie UV émise (Masschelein W. J., 2000).....	21
Figure 12 : Spectres d'absorption des bases azotées (Kowalski, 2009).....	23
Figure 13 : Structure chimique des photoproduits dimériques de pyrimidine induits par les rayonnements UVB et UVC dans l'ADN.	23
Figure 14 : Spectres d'absorption des rayonnements UV/Visible des ions nitrate et nitrite (Mack et Bolton, 1999).....	30
Figure 15 : Schéma d'un dispositif d'irradiation de laboratoire (OENORM, 2001).....	42
Figure 16 : Plage admissible pour la courbe d'inactivation du biosimètre (OENORM, 2001).....	43
Figure 17 : schéma du montage d'essai (OENORM, 2001).....	44
Figure 18 : Exemple de représentation de la plage de fonctionnement admissible : éclairage énergétique minimal et débit maximal (OENORM, 2001).....	46

Liste des tableaux

<i>Tableau I : Caractéristiques des lampes à vapeur de mercure (USEPA, 2006).....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau II : efficacité des rayonnements UV sur la réduction du nombre de bactéries cultivables (adapté à partir de Hijnen et al., 2006).....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau III : Inactivation des virus (Adapté de Hijnen et al., 2006)</i>	<i>27</i>
<i>Tableau IV : Inactivation des bactériophages par les UV (Adapté de Hijnen et al., 2006).....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau V : Inactivation de protozoaires (Adapté de Hijnen et al., 2006).....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau VI : Exemples de groupements chromophores dans le domaine de longueurs d'onde 220-350nm (d'après Kowalski, 2009).....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau VII : Exemples de rendements de photolyse UV de quelques composés organiques en fonction de la dose appliquée.....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau VIII : Efficacité comparée des lampes basses pression et moyenne pression sur i) l'inactivation et ii) la capacité de reviscidence de quelques microorganismes.....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau IX : liste de micro-organismes préconisés pour l'évaluation de l'efficacité de désinfection des réacteurs à rayonnements UV et leur sensibilité aux rayonnements UV (d'après USEPA, 2006)</i>	<i>41</i>
<i>Tableau X : Exemple de résultats des mesures biosimétriques</i>	<i>45</i>

Composition du groupe de travail

❖ Membres :

Mme Sylvie DUBROU - Présidente

Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris – Mairie de Paris – PARIS
Membre du Comité d'experts spécialisé «EAUX»

Mme Sylvie RAUZY

ONEMA - Vincennes
Personnalité compétente

Mme Bénédicte WELTÉ

Eau de Paris – PARIS
Membre du Comité d'experts spécialisé «EAUX»

M. Jean-Luc BOUDENNE

Université de Provence –CNRS / Laboratoire Chimie Provence - UMR6264
Membre du Comité d'experts spécialisé «EAUX»

M. Pierre LEROY

Personnalité compétente

M. Antoine MONTIEL

Membre du Comité d'experts spécialisé «EAUX»

M. René SEUX

Membre du Comité d'experts spécialisé «EAUX»

❖ Relecteurs :

M. Yves LÉVI

Université - Paris Sud 11 – Faculté de pharmacie
Président du Comité d'experts spécialisé « Eau »

M. Patrick MAZELLIER

Université de Bordeaux - IUT Périgueux – Laboratoire de physico et toxicochimie de l'environnement – Institut des sciences moléculaires – UMR-CNRS 5255
Membre du Comité d'experts spécialisé « Eau »

❖ Correspondant de la Direction générale de la santé :

Mme Aurélie THOUET

Ministère chargé de la santé - Direction générale de la santé - Bureau de la qualité des eaux – PARIS

❖ Coordination scientifique Anses :

Mme Juliette HOSPITALIER-RIVILLON

Direction de l'évaluation des risques nutritionnels et sanitaires - Unité d'évaluation des risques liés à l'eau - Anses - MAISONS ALFORT

❖ Ont été auditionnés les représentants des entreprises suivantes :

BIO UV

BORDAS-UVGERMI

COMAP WTI

OTV

ITT

WALLACE & TIERNAN

PRO MINENT

STEREAU

TROJAN UV

DEGREMONT

OZONIA

ABIOTEC

Définitions et glossaire

Biodosimètre : micro-organisme dont la sensibilité aux rayonnements UV a été déterminée dans des conditions statiques de laboratoire

Biodosimétrie : méthode de mesure de la dose de rayonnements UV délivrée par un réacteur UV en utilisant un biodosimètre.

Chromophore : ensemble d'atomes à l'origine de la couleur d'une molécule. La couleur provient de la capacité de cet assemblage d'atomes à absorber l'énergie de photons dans une gamme du spectre UV-visible tandis que les autres longueurs d'onde sont transmises ou diffusées. Dans les organismes vivants, les chromophores ont pour fonction la détection de la lumière (photorécepteur) ou l'absorption de l'énergie lumineuse (photosynthèse).

Coefficient d'extinction (ou d'absorption) molaire (ϵ) : Défini à une longueur d'onde donnée, il traduit l'aptitude d'une molécule à absorber la radiation considérée. Il dépend du milieu (solvant) et de la température. Il s'exprime en $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$.

Cofacteur (ou coenzyme) : partie non protéique de l'enzyme. A distinguer de l'apoenzyme qui est la partie protéique de l'enzyme. Par exemple, la photolyase est une enzyme constituée d'un cofacteur rédox, le FAD, lié de manière non covalente à l'apoenzyme.

« **Dark repair** » : mécanisme de réparation de l'ADN par réaction enzymatique (indépendante de l'énergie photonique).

Dose (D) : quantité d'énergie reçue par un micro-organisme soumis à un rayonnement d'intensité i durant un temps t

$$D = i \times t$$

Unité $W \cdot s/m^2$ ou J/m^2

Dose minimale requise : dose nécessaire pour obtenir le niveau de désinfection recherché en terme d'abattement souhaité.

Dose reçue : dose que reçoit réellement le micro-organisme, calculé à partir de données établies lors d'essais en laboratoire

Dose UV ou fluence (H') : énergie totale radiative traversant une sphère infiniment petite de section transversale de surface dA , divisée par dA . La dose UV est le taux de fluence (E') multiplié par le temps d'irradiation exprimé en seconde. La dose UV s'exprime en J/m^2 , mais la dose UV est souvent donnée en mWs/cm^2 ou mJ/cm^2 .

Irradiance (E) ou éclairage énergétique: valeur de mesure du flux lumineux divisé par l'aire de la surface qui reçoit le rayonnement. Elle s'exprime en W/m^2 .

Purines : bases azotées constituant les molécules d'ADN et d'ARN (adénine, guanine).

Pyrimidines : bases azotées hétérocycliques aromatiques de formule brute $C_4H_4N_2$. Les pyrimidines sont l'ensemble de ses dérivés retrouvés dans les bases azotées constituant les molécules d'ADN et d'ARN (cytosine, thymine, uracile). Ces bases sont particulièrement touchées dans les réactions de photochimie sous rayonnements UV.

Photoréactivation : mécanisme métabolique de réparation de l'ADN induit par une énergie photonique.

Réacteur UV : dispositif de traitement d'eau par rayonnements UV.

Rendement quantique (Φ): nombre de molécules photolysées rapporté au nombre de photons absorbés pendant le même temps.

Solarisation : effet des rayonnements visibles et UV (<380 nm) sur les parois des lampes rendant celles-ci plus ou moins opaques avec le temps. Le dopage du quartz avec des oxydes de cérium permet de réduire ce phénomène.

Taux de fluence (E'): puissance radiative émise dans toutes les directions, traversant une sphère infiniment petite, de section transversale de surface dA , divisée par dA . Le taux de fluence s'exprime en W/m^2 , mais de façon pratique, on utilise le $\mu W/cm^2$ ou le mW/cm^2 . Ce terme est équivalent à l'irradiance dans le domaine des réacteurs UV.

Temps de contact (t) : temps durant lequel l'eau et/ou les micro-organismes sont exposés aux rayonnements UV.

Temps de séjour hydraulique (théorique) : temps de résidence théorique de l'eau dans le réacteur obtenu en divisant le volume du réacteur UV par le débit de circulation.

Transmittance (%) : capacité d'un milieu (ici l'eau) à laisser passer les rayonnements UV. Plus la transmittance est élevée, plus les rayonnements UV pénètrent dans l'eau.

Abréviations

Afssa :	Agence Française de sécurité sanitaire des aliments
AMM :	Autorisation de mise sur le marché
Anses :	Agence nationale chargée de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
CSP :	Code de la Santé Publique
EDCH :	Eau destinée à la consommation humaine
ENDWARE :	European network drinking water regulators
FAD :	Flavine Adénine Dinucléotide
UV :	Rayonnements ultra-violets
BP :	À basse pression
MP :	À moyenne pression
UFC :	Unité formant colonie
UPC :	Unité formant plaque
W/cm :	Watt par centimètre de longueur de lampe

Introduction

L'eau destinée à la consommation humaine est un aliment vital. À ce titre elle doit être distribuée en continu, en quantité suffisante et présenter la meilleure qualité possible. Les traitements spécifiques de potabilisation évoluent au fil des innovations. Ces innovations permettent de répondre à des problèmes sanitaires ou techniques, mais il est nécessaire de s'assurer de leur efficacité et de leur innocuité sanitaire au regard des qualités organoleptiques, chimiques et/ou microbiologiques de l'eau.

Les premières applications du traitement par irradiation UV des eaux potables pour la désinfection des eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) datent du début du XX^{ème} siècle suite au développement des lampes à vapeur de mercure et des tubes en quartz entourant ces lampes, et suite aux études établissant l'effet biocide de tels systèmes (Henry *et al.*, 1910). Aujourd'hui ces réacteurs sont utilisés dans les usines de potabilisation pour désinfecter l'eau, notamment pour leur action vis-à-vis *Cryptosporidium* et *Giardia*. Ces micro-organismes sont à l'origine d'épidémies humaines via la consommation d'eau contaminée et les biocides classiquement utilisés pour désinfecter les EDCH ne sont pas efficaces pour les inactiver (OMS, 2009).

Les dispositions réglementaires concernant les réacteurs UV équipés de lampes à vapeur de mercure à basse pression, et utilisés pour un traitement bactéricide classique, sont précisées dans une circulaire de 1987 (DGS, 1987). Pour les revendications portant notamment sur l'inactivation des protozoaires appartenant aux genres des *Cryptosporidium* et des *Giardia* et pour la mise en œuvre de lampes à vapeur de mercure à moyenne pression, les réacteurs UV sont considérés comme des procédés innovants. Selon le Code de la santé publique (CSP) (articles R.1321-1 et suivants), l'évaluation de l'innocuité et de l'efficacité des produits et procédés de traitement innovants se fonde sur un dossier comportant les éléments définis dans l'arrêté du 17 août 2007 modifié (DGS, 2007). Depuis sa création l'Afssa et aujourd'hui l'Anses a en charge l'évaluation scientifique et technique de ces dossiers de demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM).

A partir de l'expérience capitalisée sur les demandes d'autorisation des réacteurs UV, en prenant en compte les évolutions des connaissances, des revendications, des technologies et des méthodes d'analyse et en cohérence avec le contexte communautaire relatif à ces traitements, l'Anses propose dans le présent rapport des lignes directrices pour l'évaluation des réacteur UV utilisés pour la désinfection de l'eau destinée à la consommation humaine.

Face aux multiples développements des réacteurs UV, le présent rapport n'aborde que les rayonnements UV produits à partir de lampes à vapeur de mercure (à basse pression, basse énergie ; à basse pression, haute énergie et à moyenne pression) positionnées dans le flux d'eau à traiter. De plus, les lignes directrices présentées dans ce rapport s'appliquent uniquement à la production d'eau destinée à la consommation humaine en usine de potabilisation.

1 Présentation et description des procédés mettant en œuvre des réacteurs UV

Les systèmes actuellement commercialisés en France fonctionnent soit avec des lampes à vapeur de mercure à basse pression (BP), soit avec des lampes à vapeur de mercure à moyenne pression (MP).

1.1. Généralités sur les rayonnements UV

Dans le spectre des ondes électromagnétiques, les rayonnements UV se situent entre les rayons X et le violet du spectre visible, dans la gamme des longueurs d'onde comprises entre 100 et 400 nm.

Le spectre de la lumière ultraviolette est divisé en 4 zones en fonction des effets sur la matière vivante :

- UV-A : 400 à 315 nm, produisant une pigmentation de la peau,
- UV-B : 315 à 280 nm, permettant la synthèse de vitamine D,
- UV-C : 280 à 200 nm, utilisés pour leur pouvoir biocide. C'est ce domaine qui est pris en compte dans la désinfection des eaux,
- UV < 200 nm, les rayonnements de cette partie du spectre UV induisent par exemple la production d'ozone à partir d'oxygène, et sont absorbés par la plupart des milieux.

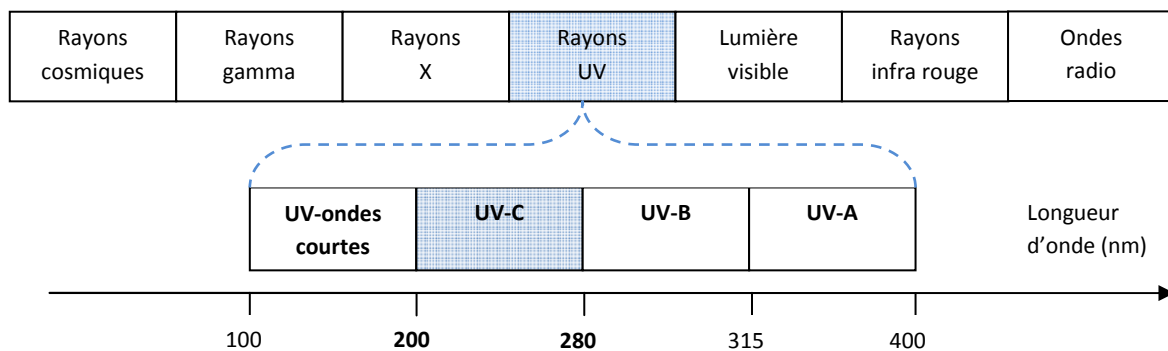


Figure 1 : Répartition des longueurs d'onde dans le domaine des ultraviolets (d'après USEPA, 2006)

Les atomes ont la capacité d'absorber de l'énergie avec la promotion d'un électron à un niveau d'énergie supérieur activé dit « excité ». Lorsque l'électron revient à son niveau fondamental, un phénomène de restitution de l'excès d'énergie aboutit à l'émission d'énergie lumineuse. Cette énergie est quantifiée. Elle est égale à :

$$\Delta E = h\nu = h c/\lambda$$

h = constante de Planck

c = célérité de la lumière

λ = longueur d'onde de la radiation émise par l'atome

La valeur de la longueur d'onde obtenue dépend de la différence d'énergie entre l'état activé et l'état fondamental.

L'activation d'atomes de mercure est la technologie la plus répandue pour la génération de rayonnements UV utilisables en traitement d'eau. Les atomes de mercure excités à différents niveaux d'énergie supérieure vont générer un spectre de raies (c'est-à-dire émission de radiations lumineuses

à différentes longueurs d'onde discrètes, d'intensité variable) lors de leur retour à l'état fondamental. Le mercure est l'élément métallique le plus volatil pour lequel une activation peut être obtenue en phase gazeuse à des températures compatibles avec les matériaux employés pour la fabrication des lampes. A température ordinaire, avant allumage des lampes, le mercure contenu dans les lampes est essentiellement à l'état liquide et non conducteur de la décharge électrique. Pour amorcer la décharge, les lampes contiennent un gaz, dit « de remplissage », plus facilement excitable. Le gaz de remplissage le plus utilisé est l'argon. Le néon et l'hélium peuvent également être utilisés. En règle générale, ce gaz est en excès par rapport au mercure gazeux. Son rôle est de faciliter le démarrage de la décharge et de promouvoir l'excitation du mercure.

1.2. Lampes utilisées pour le traitement aux rayonnements UV

Les rayonnements UV sont générés par l'arc de lumière des lampes à décharge électrique. Pour la désinfection des eaux ce sont des lampes équipées d'émetteurs à plasma qui sont utilisées. L'émission de photons par un atome est un phénomène réversible. Ainsi, un photon généré au sein d'un plasma peut être absorbé de manière réversible par un atome de mercure.

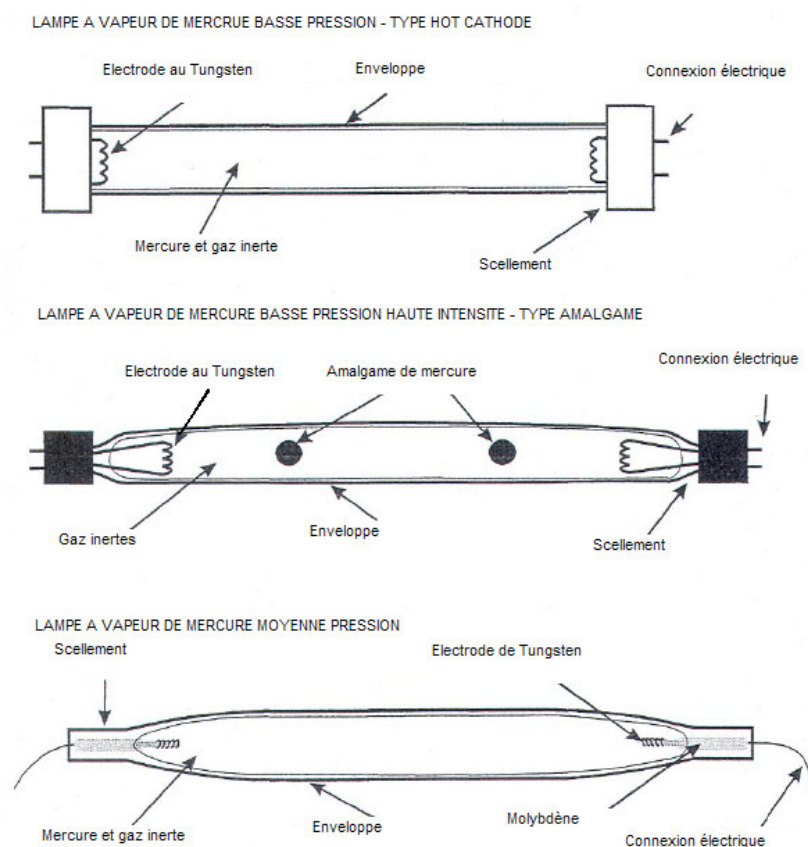


Figure 2 : Schémas de lampes à vapeur de mercure à basse et moyenne pressions (USEPA, 2006)

Les deux types de lampe (BP -basse pression- et MP -moyenne pression-) émettent dans le domaine des UV-C avec un spectre quasi-monochromatique pour les basses pressions à 253,7 nm, et polychromatique pour les moyennes pressions dont les longueurs d'onde vont des UV-C (200 à 290 nm) aux UV-A (315 à 400 nm) mais également jusqu'aux radiations visibles. Aujourd'hui, de nouveaux types de lampes tels que ceux présentés dans l'annexe E sont mis sur le marché mais ne sont pas autorisés dans les usines de production d'eau destinée à la consommation humaine.

1.2.1. Lampes à vapeur de mercure

1.2.1.1. Lampes à basse pression (BP)

Les **lampes à basse pression** fonctionnent avec une pression de vapeur de mercure de l'ordre de 100 à 1000 Pa ; un gaz de remplissage vient compléter la vapeur de mercure. Le gaz de remplissage est en excès de 10 à 100 fois par rapport à la vapeur de mercure. Du mercure liquide reste toujours présent dans les conditions thermiques d'équilibre nominal de fonctionnement. La pression partielle de la vapeur de mercure à l'intérieur de la lampe est de l'ordre de 1 Pa.

Les lampes sont alimentées au moyen de courant alternatif à basse fréquence (50 Hz). En cas de chute de tension, l'émission est pratiquement éteinte.

Ces lampes ont l'avantage d'avoir une émission quasi-monochromatique avec une raie à 253,7 nm. Une deuxième raie existe à 184,9 nm mais elle est, en général, éliminée par l'utilisation de verres optiques, de quartz dopé par du dioxyde de titane ou encore par l'air séparant la lampe de la gaine de protection. Les émissions à des longueurs d'onde supérieures à 300 nm sont également présentes mais elles peuvent être négligées dans le traitement des eaux. La norme autrichienne OENORM M.5973-1 précise que l'émission à 253,7 nm doit représenter au moins 85 % de l'intensité UV-C (200-280 nm) totale.

La raie à 253,7 nm (figure 3) correspond à une longueur d'onde proche du maximum d'absorption de l'ADN et de l'ARN. Ceci entraîne une plus grande efficacité de ces lampes BP puisque l'essentiel de l'énergie est émise à une longueur d'onde biocide. Cependant, la puissance de ces lampes BP est limitée à quelques centaines de Watts biocides. Elles ont par ailleurs l'inconvénient d'être très longues à ce niveau de puissance : jusqu'à 1 mètre voire 1,5 mètres.

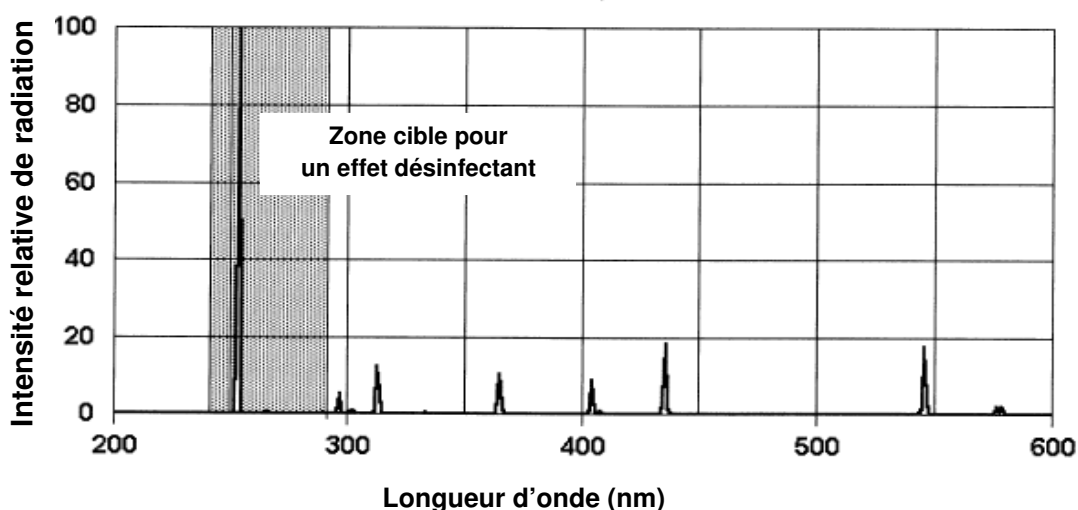


Figure 3 : Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure à basse pression (DVGW W 294-1, 2006) (la raie à 184,9 nm ne figure pas sur le spectre).

Deux paramètres influencent le rendement des lampes à basse pression :

- la température de la paroi de la lampe qui agit directement sur la tension de vapeur de mercure le long de la paroi interne de la lampe. Si elle est trop basse, il y a une chute du rendement d'émission ; si elle est trop élevée, la pression de vapeur de mercure est accrue et l'auto absorption augmente, ce qui diminue le rendement d'émission. Pour cette raison les lampes émettrices sont montées dans une gaine en quartz à l'intérieur de laquelle de l'air circule afin de modérer l'effet de refroidissement par l'eau.

- le vieillissement des lampes : au cours des 100 à 200 premières heures de fonctionnement, une chute du rendement d'émission est observée. La cause du vieillissement est la solarisation du matériau de la paroi de la lampe ainsi que la formation de dépôts d'oxydes sur les électrodes. Une opération allumage/extinction correspond à un vieillissement équivalent à la première heure de fonctionnement en conditions nominales.

Les lampes à basse pression nécessitent une température d'environ 40°C et consomment 0,5 à 0,6 W/cm (par centimètre de longueur de lampe) de puissance électrique.

Les lampes à basse pression haute énergie fonctionnent à environ 90°C. La puissance électrique consommée est de 2 à 3 W/cm pour une émission de 0,3 W/cm à 0,5 W/cm. Leur puissance énergétique est un avantage mais elles mettent plus de temps à chauffer pour atteindre la performance maximale.

1.2.1.2. Lampes à moyenne pression (MP)

Les **lampes à moyenne pression** fonctionnent avec une pression de vapeur de mercure de l'ordre de 10 kPa, ce qui permet à ce type de lampes d'atteindre des puissances électriques 100 fois plus élevées que les lampes à basse pression, c'est-à-dire quelques dizaines de W/cm. Cependant, ce gain, en termes de puissance électrique, a pour contrepartie l'apparition d'un spectre d'émission quasi continu entre 200 et 300 nm, et une émission qui devient majoritaire aux longueurs d'onde supérieures à 300 nm (pour les autres raies d'émission du mercure entre 300 et 600 nm), ce qui réduit le rendement biocide de 10 à 15%. Elles peuvent disposer de gaines de quartz dopées en titane qui coupent toutes les longueurs d'ondes inférieures à 230 nm, limitant ainsi les réactions avec d'autres substances présentes dans l'eau pouvant former des composés indésirables (cf. § 2.3).

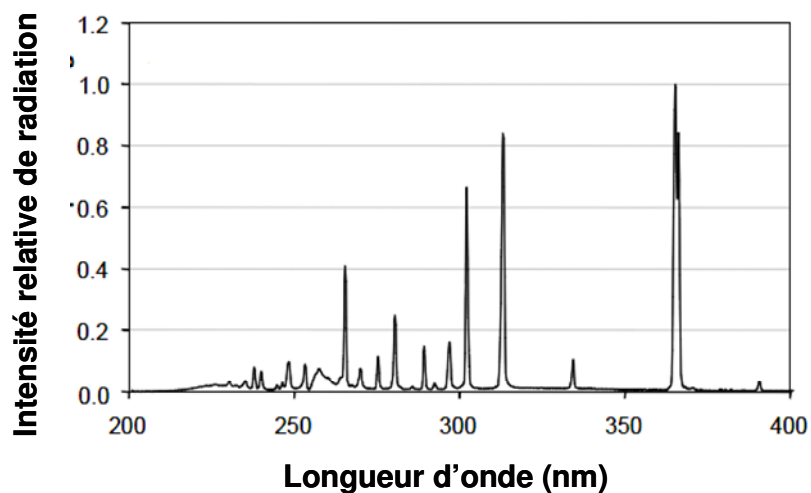


Figure 4 : Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure à moyenne pression (d'après OENORM, 2003)

En conditions normales de fonctionnement, il n'existe pas de mercure en phase liquide restant présent dans la lampe.

Les lampes à vapeur de mercure à moyenne pression fonctionnent dans une gamme de tension allant de 5 à 30 V/cm. L'énergie UV émise est proportionnelle à la tension d'alimentation qui détermine également la puissance électrique moyenne d'alimentation des lampes (80 à 250 W/cm). En

accroissant la puissance électrique, les bandes émissives sont élargies. Ce phénomène constitue une contrainte qui sera abordée au chapitre spectre d'émission.

La partie la plus froide d'une lampe à vapeur de mercure à moyenne pression atteint des températures de l'ordre de 400 °C. Le contact entre la paroi de la lampe et l'eau est banni. Ces lampes sont donc obligatoirement insérées dans une gaine en quartz ventilée pour abaisser la température de la paroi au contact de l'eau à traiter.

La durée de vie généralement admise pour les lampes à moyenne pression est de 8 000 à 10 000 heures. Le vieillissement entraîne une modification dans le spectre d'émission.

L'émission des lampes à vapeur de mercure à moyenne pression est polychromatique avec de nombreuses raies d'émissions dans l'UV mais également dans les domaines du visible et de l'infrarouge.

La norme OENORM M.5873-2 précise que les lampes utilisées pour la désinfection des eaux ne doivent pas émettre à des longueurs d'onde inférieures à 240 nm une énergie supérieure à 3 % de celle émise aux longueurs d'onde comprises entre 240 et 400 nm. La norme DVGW 294-1 précise que la puissance rayonnante dans l'eau, sur la plage de longueur d'onde inférieure à 240 nm doit être de moins de 5 % de la puissance rayonnante totale entre 240 et 290 nm.

En effet, une énergie importante à des longueurs d'onde inférieure à 240 nm peut conduire à des réactions secondaires (*cf.* § 2.3.). Le spectre d'émission de la lampe doit être mesuré à faible puissance de la lampe. Contrairement aux lampes à basse pression, la puissance émise à la longueur de 253,7 nm ne doit pas être supérieure à 85 % de la puissance émise sur l'ensemble de la plage des UV-C.

Le tableau I résume les caractéristiques des différentes lampes.

Tableau I : Caractéristiques des lampes à vapeur de mercure (USEPA, 2006)

Paramètres	Lampe à basse pression	Lampe à basse pression Haute intensité	Lampe à moyenne pression
Longueur (m)	0,2 à 1,5	0,1 à 1,5	0,2 à 1
Diamètre (cm)	1,5 à 3		1,5 à 4,5
Lumière	Monochromatique à 254 nm	Monochromatique à 254 nm	Polychromatique à 200 – 300 nm
Pression du mercure (Pa)	Environ 0,93	0,18 à 1,6	40000
Température °C	Environ 40	60 – 100	600 – 900
Dose UV appliquée W/cm	0,2	0,5 à 3,5	5 à 30
Puissance électrique consommée W/cm	0,5	1,5 à 10	50 à 250
Rendement de conversion de la puissance électrique appliquée à la dose « biocide » (%)	35 à 38	30 à 35	10 à 20
Nombre de lampes nécessaires	Elevé	Intermédiaire	Faible
Durée de vie (heures)	8 000 – 10 000	8 000 – 12 000	4 000 – 8 000

1.2.2. Gaines de quartz

Les lampes sont montées dans une gaine en quartz dont le diamètre est de l'ordre de 2,5 cm pour les lampes à basse pression et de 5 à 10 cm pour les lampes à moyenne pression. La distance entre la lampe et la gaine est de 1 cm.

Pour les lampes à moyenne pression, les gaines sont en quartz dopé (dioxyde de titane par exemple) pour absorber les radiations de longueur d'onde inférieure à la limite retenue pour réduire les réactions photochimiques indésirables. Certains constructeurs utilisent des films protecteurs qui absorbent également des longueurs d'onde.

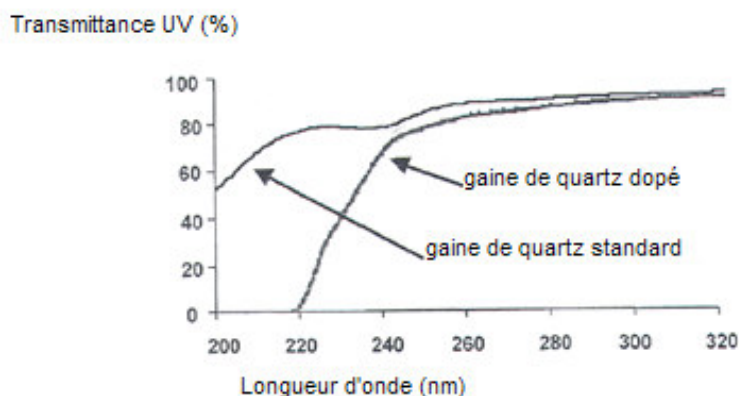


Figure 5 : Spectre de transmission d'un quartz dopé et d'un quartz non dopé (USEPA, 2006)

Nettoyage des gaines

En contact avec l'eau, ces gaines constituent un lieu de dépôt privilégié (carbonate de calcium, oxydes métalliques...). Afin de conserver une bonne transmission des rayonnements elles doivent être maintenues propres. Deux modalités de nettoyage sont couramment utilisées :

- le nettoyage mécanique qui peut être réalisé pendant les cycles de traitement d'eau. Un anneau racler en téflon passe régulièrement le long de la gaine,
- le nettoyage chimique qui est mis en œuvre en dehors des cycles de traitement. Une solution d'acide (acide citrique, acide phosphorique) circule au travers du réacteur mis à l'arrêt puis une séquence de rinçage est déclenchée.

1.2.3. Ballasts

Les ballasts assurent l'alimentation électrique des lampes, permettent le démarrage des lampes et contrôlent la puissance électrique transmise. Il existe trois types de ballast : des ballasts inductifs, capacitifs et des ballasts électroniques.

Pour les ballasts capacitifs, l'intensité du courant traversant la lampe ne varie pas avec le voltage appliqué. Avec les ballasts inductifs, le courant traversant la lampe est fonction de l'inductance, du voltage appliqué et des propriétés de la lampe. Les ballasts inductifs sont les plus utilisés pour les lampes à moyenne pression, en raison de leur durabilité et de leur stabilité.

Les ballasts électroniques contiennent des semi conducteurs.

1.3. Réacteurs

1.3.1. Composantes d'un réacteur

L'énergie électrique, apportée par un ballast, excite les vapeurs de mercure à un niveau d'énergie suffisant pour émettre des rayonnements UV. La lampe est placée dans un carter et l'eau circule en couche mince, entre ce dernier et la gaine de quartz, car l'eau absorbe très rapidement l'énergie des rayonnements UV. Le carter peut contenir une ou plusieurs lampes en fonction du débit à traiter et de l'énergie à apporter.

L'eau absorbe plus intensément les rayonnements UV que la lumière visible. Les rayonnements UV s'affaiblissent proportionnellement à leur éloignement de la source. Les émetteurs doivent donc être placés très près les uns des autres.

Une diminution exponentielle de la pénétration des rayonnements UV résulte d'une épaisseur de couche augmentant linéairement et d'une augmentation de l'absorbance UV de l'eau.

1.3.2. Hydraulique de fonctionnement des réacteurs

Les premiers réacteurs utilisés étaient conçus pour de petits débits ($5 \text{ m}^3/\text{h}$). Dans ce cas, la configuration est celle d'un réacteur tubulaire au centre duquel est installée la lampe entourée d'un tube de protection. L'eau circule entre le tube de protection et la paroi intérieure du réacteur. Selon la loi de Beer-Lambert, l'intensité diminue exponentiellement entre la paroi du tube de protection et la paroi du réacteur.

La figure 6 montre un équipement de désinfection aux rayonnements UV.

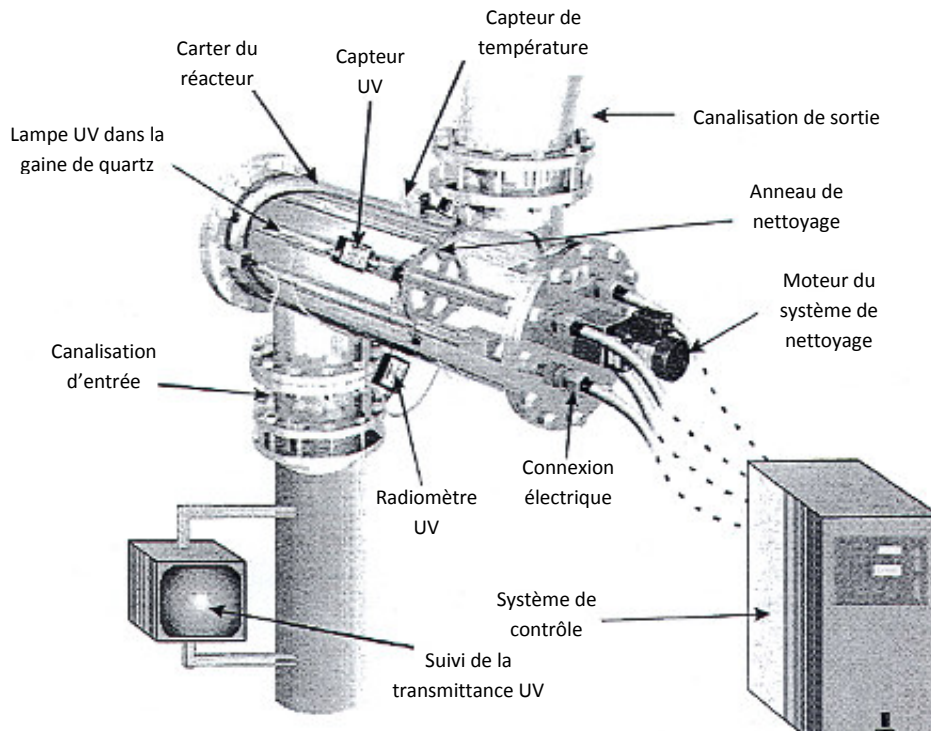


Figure 6 : Exemple d'équipement de désinfection par rayonnements ultraviolets (USEPA, 2006)

Les réacteurs utilisés pour la production d'eau potable sont des réacteurs fermés.

Selon les technologies, les lampes peuvent être en position axiale ou perpendiculaire au flux comme le montrent les figures 7 et 8.

Dans certains réacteurs, elles sont placées en dehors du flux d'eau et les rayonnements sont réfléchis sur le trajet hydraulique.

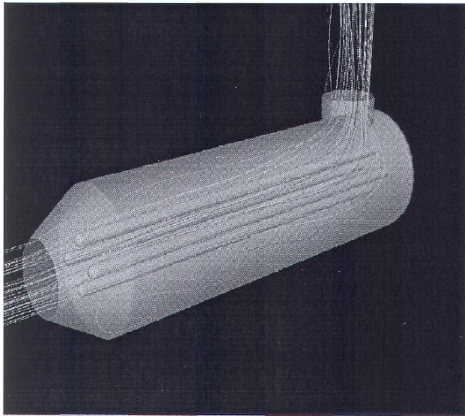


Figure 7 : Position axiale du réacteur par rapport au flux (USEPA, 2006)

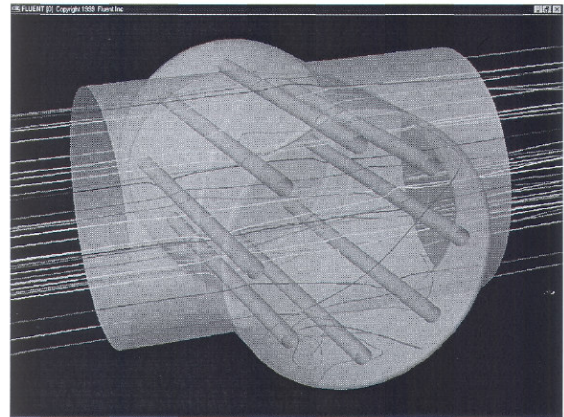


Figure 8 : Position perpendiculaire du réacteur par rapport au flux (USEPA, 2006)

1.3.3. Modélisation hydraulique

La distribution de dose au sein d'un réacteur UV dépend de nombreuses variables, souvent interdépendantes : géométrie du réacteur, nombre, espacement et puissance des lampes, caractéristiques des gaines des lampes, disposition des déflecteurs, vitesse et transmittance de l'eau (cf. §1 de l'annexe A).

C'est pourquoi la conception et le dessin industriel des réacteurs UV par les fabricants passent généralement par une étape de modélisation qui combine deux sous-modèles, appliqués successivement :

- un modèle de distribution du taux d'irradiation (fluence) au sein du réacteur : il permet de décrire la variation spatiale de l'énergie UV au sein du réacteur. Durant cette étape, le réacteur est considéré comme parfaitement agité ;
- un modèle hydrodynamique permettant de prendre en compte les phénomènes de turbulences et d'écoulement des fluides au sein du réacteur : il prend en compte le flux ou le gradient de vitesse des micro-organismes assimilés à des particules.

Il est à noter que des évolutions récentes permettent d'effectuer simultanément ces deux modélisations.

1.4. Dispositifs de contrôle

Les capteurs d'intensité UV (ou radiomètres) sont des détecteurs photosensibles utilisés pour déterminer la dose UV délivrée, par mesure de l'intensité en différents points du réacteur. En fonction de leur position, les radiomètres peuvent également répondre aux changements de l'absorbance UV de l'eau à traiter.

1.4.1. Radiomètres

Les radiomètres sont des capteurs d'énergie UV constitués de composants optiques, d'un photodétecteur, d'un amplificateur (permettant de convertir le signal électrique du photodétecteur en valeur d'irradiance) et d'une connexion électrique.

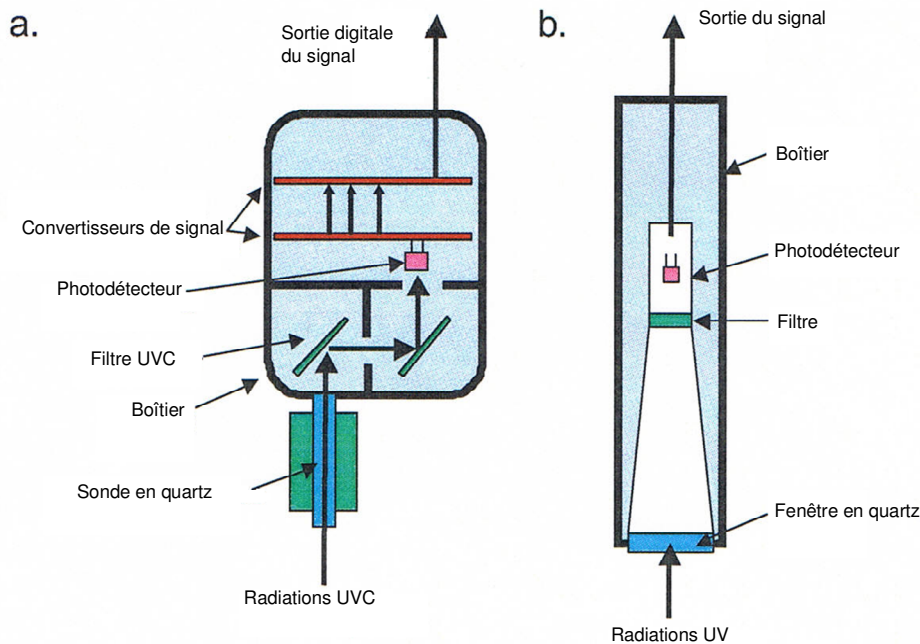


Figure 9 : Exemples de radiomètres (a. équipant un réacteur BP ; b. équipant un réacteur MP) (USEPA, 2006)

Un radiomètre idéal doit fournir une réponse linéaire sur le domaine de travail, indépendante de la température, stable au cours du temps, et insensible aux bruits de fond et aux biais (Figure 10a). De plus, il doit avoir une réponse angulaire la plus proche possible du cosinus. La figure 10b montre deux réponses angulaires de radiomètre : le radiomètre 1 est proche de l'idéal ; le radiomètre 2 ne mesure pas la totalité de la lumière incidente.

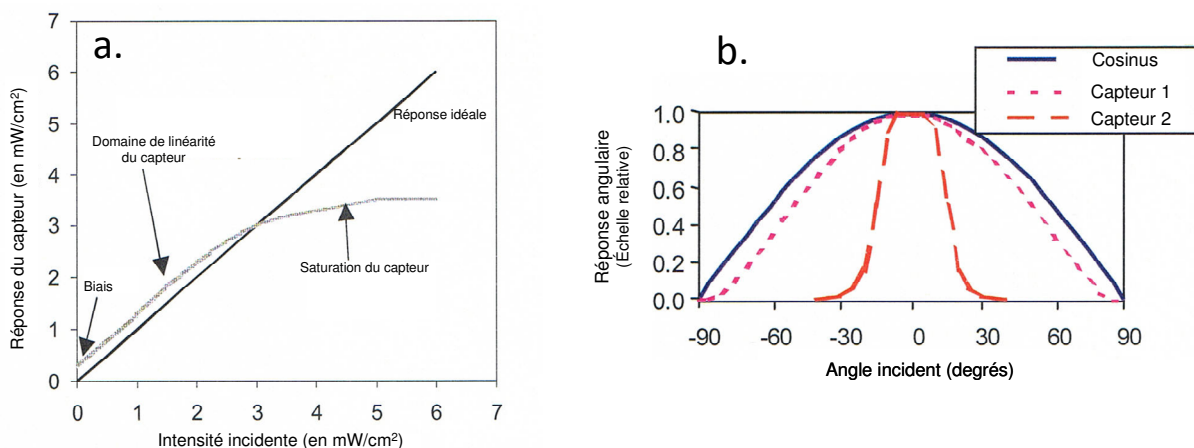


Figure 10 : Critères d'idéalité d'un radiomètre. (a. Critères de linéarité / b. Réponses angulaires) (USEPA, 2006)

L'ensemble des paramètres à prendre en compte pour évaluer les performances des radiomètres est détaillé en annexe B.

Les radiomètres de suivi équipant les réacteurs UV doivent être calibrés au moins une fois par mois à l'aide d'un radiomètre de référence (recommandation de l'USEPA, 2006). De plus, d'après la même source, les réacteurs équipés de lampes à moyenne pression doivent avoir un radiomètre par lampe et ceux équipés de lampes à basse pression doivent en avoir un par rangée de lampes.

1.4.2. Radiomètres de référence

Les radiomètres de référence sont des appareils de mesure indépendants de ceux employés pour le contrôle de l'efficacité des appareils de désinfection UV. Ils doivent être étalonnés dans des laboratoires habilités avec un radiomètre témoin pour un rayonnement de 253,7 nm. L'incertitude d'étalonnage doit être inférieure ou égale à 6 %. Après 100 heures de fonctionnement et au plus tard tous les deux ans, les radiomètres de référence doivent faire l'objet d'un nouvel étalonnage et d'un nouveau calibrage.

Les radiomètres d'appareils doivent être étalonnés de telle sorte que leur valeur de mesure corresponde à celle du radiomètre de référence. Après 10 000 heures de fonctionnement et au plus tard tous les deux ans, ils doivent être à nouveau étalonnés et calibrés. Si la valeur de mesure du radiomètre d'appareil est supérieure de plus de 5 % à la valeur du radiomètre de référence, un calibrage est nécessaire.

Le domaine de mesure et l'affichage des radiomètres de réacteur UV doivent être adaptés à la puissance rayonnante à surveiller. Les têtes de mesure des radiomètres doivent être marquées de sorte que le type, le fabricant, le numéro de série et les propriétés soient clairement reconnaissables afin de permettre de déterminer si le type et le domaine de mesure du radiomètre sont adaptés au réacteur UV concerné.

1.4.3. Suivi de la consommation électrique de la lampe

La mesure en continu de la consommation de courant du réacteur permet de savoir si la lampe fonctionne correctement ou si elle présente un vieillissement anormal. Il existe une corrélation entre la tension d'alimentation (U en Volt) ou la puissance (P) débitée et l'énergie UV émise ($P=UI$ en Watt).

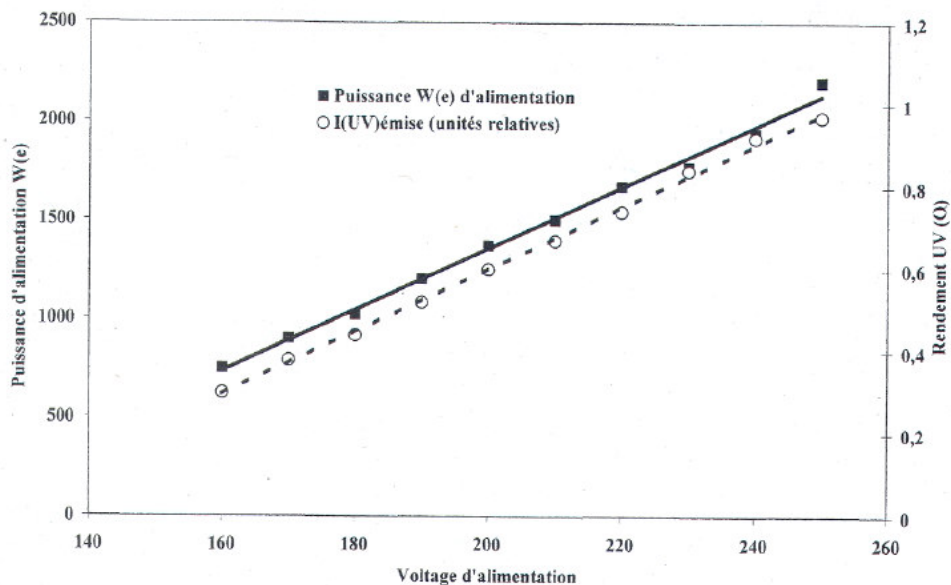


Figure 11 : Corrélation entre la tension d'alimentation ou la puissance débitée et l'énergie UV émise (Masschelein W. J., 2000)

(I = énergie UV totale entre 240 et 380 nm en unités relatives ; e = puissance électrique d'alimentation). La corrélation précise entre l'énergie émise I , et la puissance d'alimentation électrique $W(e)$ dépend également du ballast et du transformateur, mais il est important de noter que la corrélation est pratiquement linéaire pour une conception et une construction données.

2. Intérêts et risques associés à l'utilisation des procédés mettant en œuvre des réacteurs UV

L'une des étapes de désinfection dans les filières de traitement des EDCH peut comporter des réacteurs UV. Ils permettent une désinfection locale mais ne présentent pas d'effet rémanent comme peuvent l'avoir certains réactifs chimiques autorisés pour le même usage. Leur efficacité d'inactivation a été montrée vis-à-vis des protozoaires d'intérêt tels que *Cryptosporidium* et *Giardia* sur lesquels les désinfectants classiques n'ont pas l'efficacité nécessaire (OMS, 2009). Ces technologies présentent donc un intérêt au regard de la sécurité sanitaire des EDCH.

2.1. Mécanismes d'action

Lors d'une réaction photochimique simple, un composé A est transformé en un ou plusieurs composés, sous l'action d'une irradiation mono ou polychromatique.

Le rendement quantique Φ_λ de photolyse du composé A est défini à la longueur d'onde d'irradiation λ comme le nombre de molécules dégradées par photon absorbé.

Un composé A ne peut donc être photolysé à la longueur d'onde λ par voie directe que :

- si A absorbe le rayonnement UV, ce qui implique que son coefficient d'absorption molaire ϵ_λ à la longueur d'onde λ ne soit pas négligeable ;
- si le rendement quantique Φ_λ est suffisamment élevé.

L'efficacité de la réaction photochimique va être directement proportionnelle au produit ($\epsilon_\lambda \times \Phi_\lambda$).

L'ensemble du spectre des rayonnements UV peut initier des réactions de photolyse avec des éléments minéraux ou composés organiques présents dans l'eau, mais la formation de composés secondaires est particulièrement marquée pour des rayonnements UV les plus énergétiques de longueurs d'onde inférieures à 230 nm.

Avec les lampes à vapeur de mercure à basse pression, des réactions secondaires se produisent à des doses d'irradiation de l'ordre de ou supérieures à 1000 J/m², beaucoup plus élevées que celles couramment utilisées pour la désinfection (250 à 400 J/m²). En effet, les lampes à vapeur de mercure à basse pression émettent un rayonnement quasi monochromatique à 253,7 nm ce qui limite sensiblement les risques de formation de composés indésirables.

Les lampes à vapeur de mercure à moyenne pression émettent un rayonnement polychromatique de longueurs d'onde variant de 200 nm à 800 nm (mais seulement 10 à 15 % de la puissance du rayonnement est émise aux longueurs d'onde comprises entre 200 et 280 nm). En pratique, ces lampes à moyenne pression, utilisées pour la désinfection des eaux de distribution publique, émettent dans la gamme de longueurs d'ondes de 230-240 nm à 800 nm car elles sont toutes équipées de dispositifs permettant d'arrêter les rayonnements UV de longueurs d'onde inférieures à 230-240 nm. Ceci, afin de limiter les risques de réactions secondaires.

2.1.1. Action des rayonnements UVB et UVC sur les micro-organismes

L'effet biocide des rayonnements UV (UVB et UVC : gamme 200 – 315 nm) est principalement lié au fait qu'ils sont absorbés par l'ADN et l'ARN, molécules qui supportent les fonctions répliquatives et métaboliques. En effet, l'ADN et l'ARN sont constitués d'un enchaînement de nucléotides qui inclut des bases puriques (adénine, guanine) et des bases pyrimidiques (cytosine, thymine ou uracile). Les spectres d'absorption des quatre nucléotides de l'ADN (figure 12) montrent un maximum d'absorption autour de 260 nm.

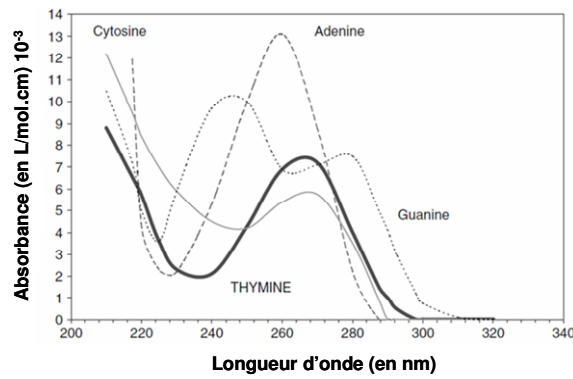


Figure 12 : Spectres d'absorption des bases azotées (Kowalski, 2009)

Cette absorption induit des réactions de dégradation impliquant plus particulièrement les bases pyrimidiques de l'ADN (thymine et cytosine) et de l'ARN (uracile et cytosine). Des réactions de dimérisation sont alors induites aux sites comprenant deux pyrimidines adjacentes. Plusieurs types de photoproduits sont alors formés : les dimères de type cyclobutane (70 à 80% des photoproduits) et les adduits pyrimidine (6-4) pyrimidone (20 à 30%). Ces derniers peuvent ensuite être transformés photochimiquement par les UVA en isomères de valence Dewar (figure 13). Les UVB peuvent ainsi générer 3 types de photoproduits pour chacun des 4 doublets de pyrimidine, ce qui engendre donc 12 lésions dans le génome d'un brin d'ADN (Banyasz *et al.*, 2009).

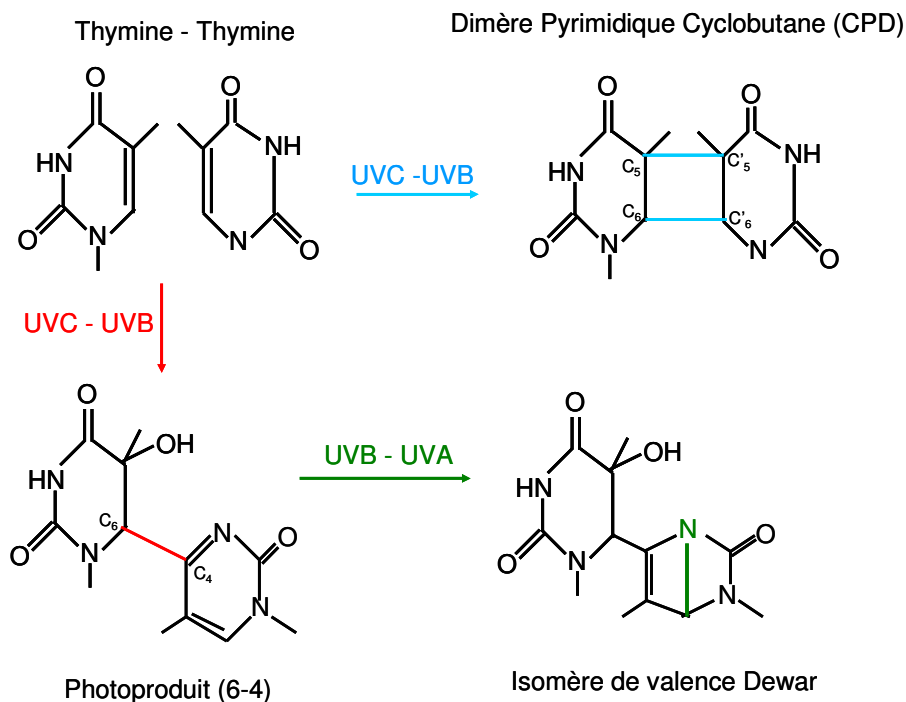


Figure 13 : Structure chimique des photoproduits dimériques de pyrimidine induits par les rayonnements UVB et UVC dans l'ADN.

La figure ne montre que les lésions thymine – thymine (TT) mais des composés équivalents peuvent se former entre thymine et cytosine ou entre 2 cytosines (d'après Banyasz *et al.*, 2009)

Lors de la formation des dimères pyrimidiques cyclobutanes (CPD), les liaisons hydrogène qui étaient présentes entre les deux pyrimidines adjacentes (cas des thymines sur la figure 13), sont affaiblies

par la perte d'aromaticité. De plus, les liaisons du cyclobutane formé perturbent la structure de l'ADN, créant ainsi une distorsion dans l'hélice de l'ADN. Cette lésion bloque la réplication et la transcription, ce qui conduit aux effets cytotoxiques et mutagènes, induisant la mort des micro-organismes irradiés (Cheung *et al.*, 1999).

2.1.2. Action des rayonnements UVA sur les micro-organismes

L'effet des rayonnements UVA (315 – 400 nm) est lié à des processus d'oxydation. L'ADN ne les absorbe pas mais ils peuvent exciter des chromophores endogènes qui sont à l'origine des réactions d'oxydation attribuées à la formation d'espèces actives, notamment d'oxygène singulet (Cadet *et al.*, 2009). Ces espèces radicalaires induisent des effets létaux ou sublétaux pour les cellules (Oppezzo et Pizarro, 2001).

2.2. Efficacité

2.2.1. Cinétique d'inactivation

Lors de la désinfection des EDCH, et en fonction des doses utilisées, la revendication d'efficacité des désinfections sera différente et dépendante du type de micro-organisme cible. Dans tous les cas, les recommandations d'utilisation doivent être spécifiées pour que l'efficacité recherchée soit atteinte.

Les constituants de l'eau peuvent affecter la performance de la désinfection UV. Les paramètres les plus sensibles sont l'absorbance UV, la teneur en particules de l'eau, les concentrations en éléments (fer par exemple) qui peuvent provoquer un encrassement du réacteur et les algues.

La transmittance de l'eau est très importante. Si elle diminue, l'énergie au sein du réacteur décroît également, ce qui réduit la dose délivrée. Ainsi, comme pour tous les autres désinfectants l'eau doit préalablement être très bien clarifiée.

Alors que la désinfection chimique utilise la notion de **C.t** (concentration en biocide et temps de contact), la désinfection par irradiation UV repose sur la notion de dose. La dose peut être définie selon l'équation :

$$\text{Dose} = P.t$$

P représente la puissance biocide délivrée

t représente le temps de contact

La principale différence entre les notions de P.t et C.t, réside en une absence de résiduel en sortie de réacteur dans le cas des UV alors qu'il reste un résiduel de concentration en biocide dans le cas d'une désinfection chimique.

Parallèlement, l'utilisation de ces deux notions dépend de nombreux paramètres.

- Le produit P.t dépend de la qualité physico-chimique de l'eau, du spectre d'émission de la lampe, de l'abattement souhaité, de la concentration initiale en micro-organismes.
- Le produit C.t dépend de la qualité physico-chimique de l'eau, de l'abattement souhaité, de la concentration initiale en micro-organismes. Il dépend également de la température de l'eau et du pH, alors que l'inactivation avec des rayonnements UV est indépendante de ces deux paramètres.

La dose de rayonnements UV nécessaire s'exprime en Joules par mètre carré (J/m^2). Elle correspond au produit de l'énergie reçue (W/m^2) par le temps d'irradiation t (secondes), temps qui dépend du débit d'eau à traiter et de la taille du réacteur.

Dose d'exposition :

$$D = (P t / S)e^{-kx} \text{ (en J/m}^2\text{)}$$

avec :

P : puissance biocide de la source de rayonnements UV (en W),

S : surface émettrice de rayonnements UV (en m²),

t : temps d'exposition d'un élément de volume (en s),

k : coefficient d'absorption des rayonnements UV de l'eau à traiter (en m⁻¹), ce coefficient varie de 2 à 10 m⁻¹ (0,02 à 0,1 cm⁻¹) pour les eaux de consommation,

x : épaisseur de la lame d'eau (en m).

La résistance des micro-organismes aux rayonnements UV peut varier de manière importante, de quelques J/cm² à plusieurs dizaines de J/cm².

2.2.2. Illustration de l'efficacité

Les données décrites dans la littérature sont obtenues à partir de souches de laboratoire qui présentent des sensibilités différentes à celles des souches sauvages de l'environnement. En l'absence de protocoles standardisés pour la préparation et le dénombrement des micro-organismes, les résultats peuvent être variables entre les études. Toutefois, les essais d'inactivation sont menés dans des conditions de laboratoire avec un appareil à faisceau collimaté, le plus souvent équipé d'une lampe à basse pression. Le temps d'exposition associé à la mesure de l'énergie avec un radiomètre étalonné permet de déterminer la dose de rayonnements UV exprimée en J/m².

2.2.2.1. Bactéries

La sensibilité aux rayonnements UV des bactéries est présentée dans le tableau II.

Des doses de rayonnements UV comprises entre 10 et 100 J/m² permettent une inactivation d'au moins 4 log des bactéries pathogènes et indicatrices de contamination fécale qui sont rendues ainsi non cultivables. *Helicobacter pylori* montre une sensibilité du même ordre puisqu'une dose de 80 J/m² est associée à un abattement de plus de 4 log (Hayes *et al.*, 2006).

Les bactéries d'origine hydrotellurique présentent des sensibilités aux rayonnements UV très variables selon les genres et les espèces. Le nombre d'*Acinetobacter baumannii* est réduit de 4 log après exposition à une dose de 48 J/m² (Templeton *et al.*, 2009). La quantité de *Legionella pneumophila* est réduite de 4 log avec une dose de 64 et 94 J/m² (Wilson *et al.*, 1992 ; Oguma *et al.*, 2004). Parmi les mycobactéries, le nombre de *Mycobacterium avium* est réduit de 4 log pour des doses de l'ordre de 200 J/m² (Hayes *et al.*, 2008 ; Shin *et al.*, 2008) alors que l'espèce *M. terrae* nécessite une dose de 100 J/m² pour une réduction de 2 log seulement (Bohrerova et Linden, 2006) et l'espèce *M. fortuitum* une dose d'au moins 500 J/m² pour une réduction de 3 log (Lee, 2009).

Des espèces susceptibles d'être associées au bioterrorisme, telles *Brucella suis*, *B. melitensis*, *Burkholderia mallei*, *B. pseudomallei*, *Francisella tularensis* et *Yersinia pestis* requièrent des doses de rayonnements UV de moins de 120 J/m² pour obtenir des abattements de 4 log (Rose et O'Connell, 2009). Elles présentent la même sensibilité aux rayonnements UV que les bactéries hydriques.

Les bactéries sous forme sporulée, quant à elles, sont plus résistantes aux rayonnements UV que sous forme végétative. Ainsi, des doses supérieures à 400 J/m² sont nécessaires pour réduire de 2 log des suspensions de spores de *Bacillus anthracis* (Rose et O'Connell, 2009) et des doses proches de 800 J/m² sont nécessaires pour abattre 4 log de spores de *B. subtilis*, germe test utilisé dans les essais de validation. Durant la sporulation, l'ADN est saturé par des protéines. Ces liaisons empêchent la formation de dimères de pyrimidine et favorisent la formation de 5-thyminy-5-6-dihydrothymine. Au cours de la multiplication cellulaire, la photoréparation restaure les thymines.

Tableau II : efficacité des rayonnements UV sur la réduction du nombre de bactéries cultivables (adapté à partir de Hijnen et al., 2006)

Bactéries	Amplitude des doses UV testées en J/m ²	Type de lampe	Réduction maximale en log
<i>Salmonella typhi</i>	20-100	BP	5,6
<i>Campylobacter jejuni</i>	5-60	BP	5,3
<i>Yersinia enterocolitica</i>	6-50	BP	5,0
<i>Shigella dysenteriae</i>	10-50	BP	5,9
<i>Shigella sonnei</i>	30-80	BP	4,7
<i>Vibrio cholerae</i>	6-40	BP	5,8
<i>Legionella pneumophila</i>	10-120	BP	4,4
<i>Legionella pneumophila</i>	5-30	BP	3,0
<i>Escherichia coli</i> 0:157	10-70	BP	5,5
<i>Escherichia coli</i>	10-150	BP	6,0
<i>Escherichia coli</i>	15-90	MP	5,2
<i>Streptococcus faecalis</i>	25-160	BP	4,6
<i>Bacillus subtilis</i> (spores)	50-780	BP	4,0
<i>Clostridium perfringens</i> (spores)	480-640	MP	3,0

2.2.2.2. Virus et bactériophages

- Virus animaux

La sensibilité aux UV des virus est présentée dans le tableau III.

Les virus à ARN tels les entérovirus, le virus de l'hépatite A, les rotavirus et les calicivirus sont réduits de 4 log avec des doses inférieures ou égales à 400 J/m². Des incertitudes existent sur les norovirus, virus dont les méthodes actuelles ne permettent pas de les cultiver.

Les adénovirus montrent une plus grande résistance aux rayonnements UV avec toutefois des différences selon le type de lampe. Ainsi, une dose de 400 J/m² émise par une lampe à basse pression ne permet de réduire que d'un log l'infectiosité des sérotypes 2, 5 et 41. Le sérotype 41, associé à des épisodes de diarrhée, s'avère plus résistant que les deux autres sérotypes à tropisme pulmonaire. Si une dose de 1 200 J/m² conduit à une inactivation de 3 log des sérotypes 2 et 5, une réduction d'un log est obtenue pour le sérotype 41 (Baxter *et al.*, 2007). Pour limiter les difficultés liées à la culture sur cellules *in vitro* de certains adénovirus, la mesure de l'inactivation par ICC-qPCR

(integrated cell culture – quantitative polymerase chain reaction) a permis de montrer une réduction de 4 log du sérotype 4 (Gerrity *et al.*, 2008).

Pour une dose donnée, les lampes à moyenne pression assurent une inactivation plus importante que les lampes à basse pression. Une réduction de 4 log du sérotype 40 est obtenue avec une dose de 600 J/m² (Linden *et al.*, 2007).

La moindre sensibilité des adénovirus aux rayonnements UV est liée à la capacité de réparation par les cellules hôtes de l'ADN viral lésé, Cette modalité de réparation ne se rencontre pas pour les virus à ARN. Les lampes à basse pression et à moyenne pression sont aussi efficaces pour endommager l'ADN viral mais les lampes à moyenne pression altèrent d'autres cibles virales qui ne sont pas réparées par les cellules hôtes (Eischeid *et al.*, 2009).

Tableau III : Inactivation des virus (Adapté de Hijnen *et al.*, 2006)

Virus	Amplitude des doses de rayonnements UV testées en J/m ²	Type de lampe	Inactivation maximale en log
Poliovirus type 1	50-500	BP	5,4
Adénovirus sérotypes 2, 15, 40, 41	80-3060	BP	6,4
Adénovirus sérotype 40	80-1840	BP	3,0
Adénovirus sérotypes 2, 41	300-900	MP	4,3
Rotavirus SA-11	50-500	BP	4,1
Rotavirus SA-11	50-300	MP	4,6
Calicivirus félin, canin	40-490	BP	5,5
Calicivirus bovin	40-330	BP	5,7
Calicivirus bovin	20-150	MP	5,9
Hépatite A	50-280	BP	5,4
Coxsackie virus B5	50-400	BP	4,8

- Bactériophages

La sensibilité aux UV des bactériophages est présentée dans le tableau IV.

Les bactériophages sont préconisés pour réaliser les tests d'efficacité aux rayonnements UV en raison de leur innocuité sanitaire et de leur facilité de manipulation au laboratoire. Le phage MS2 à ARN utilisé dans les protocoles de validation normalisés est l'un des plus résistants aux rayonnements UV.

Tableau IV : Inactivation des bactériophages par les UV (Adapté de Hijnen et al., 2006)

Bactériophages	Amplitude des doses de rayonnements UV testées en J/m ²	Type de lampe	Inactivation maximale en log
MS2	50-1390	BP	4,9
MS2	120-460	MP	5,3
φX174	20-120	BP	4,0
PRD1	90-350	BP	3,8
B40-8	10-390	BP	5,6
T7	50-200	BP	4,6
Qβ	100-500	BP	4,2

2.2.2.3. Protozoaires

La sensibilité des protozoaires aux rayonnements UV est présentée dans le tableau V.

L'efficacité des rayonnements UV vis-à-vis de l'inactivation des oocystes de *Cryptosporidium* et des kystes de *Giardia* a été démontrée à l'aide d'essais d'infectiosité (Clancy et al., 1998 ; Craik et al., 2000). Les essais d'excystation *in vitro* utilisés au préalable sous-estimaient la performance d'inactivation des rayonnements UV.

La méta-analyse de Qian et al., 2004, reposant sur une approche statistique des résultats issus de 14 publications, indique que pour obtenir un abattement d'au moins 3 log à un niveau de risque de 5%, une dose de 80 à 140 J/m² est nécessaire pour les oocystes de *Cryptosporidium sp.* et une dose de 120 à 200 J/m² pour les kystes de *Giardia sp.*

L'OMS, dans son document de synthèse relatif à la maîtrise du risque lié à *Cryptosporidium* dans l'EDCH retient une dose de 90 J/m² pour un abattement de 3 log de kystes de *Cryptosporidium*.

Les lampes à basse et moyenne pressions présentent des potentiels d'inactivation du même ordre de grandeur envers les oocystes de *Cryptosporidium* (Craik et al., 2001). Il en est de même en ce qui concerne les kystes de *G. lamblia* (Shin et al., 2009).

Les oocystes de *C. hominis*, espèce prédominant chez l'Homme, montre une sensibilité similaire à celle des oocystes de *C. parvum*, souche bovine utilisée dans la majorité des études (Johnson et al., 2005). Les kystes de *G. lamblia*, pathogène pour l'Homme, présentent également une sensibilité du même ordre que les kystes de *G. muris* (Mofidi et al., 2002) ; toutefois des différences sont relevées dans d'autres études (Linden et al., 2002 ; Craik et al., 2000).

Une réduction de 4 log de suspensions d'oocystes de *Toxoplasma gondii* est obtenue pour une dose de 400 J/m² (Dumètre et al., 2008). Cette performance n'est pas rapportée par (Wainwright et al., 2007) probablement en raison de différences dans les protocoles.

Tableau V : Inactivation de protozoaires (Adapté de Hijnen et al., 2006)

Protozoaires	Amplitude des doses de rayonnements UV testées en J/m ²	Type de lampe	Inactivation maximale en log
<i>Cryptosporidium parvum</i>	5-61	MP	3,0
<i>Cryptosporidium parvum</i>	9-131	BP	3,0
<i>Giardia muris</i>	15-110	MP	2,4
<i>Giardia lamblia</i>	0,5-15	BP	2,5
<i>Acanthamoeba</i> spp.	430-1720	BP	4,5

2.3. Réactions indésirables

2.3.1. Réactions de photolyse

L'utilisation des rayonnements UV pour la désinfection d'une eau suppose que celle-ci présente un faible spectre d'absorption aux longueurs d'onde émises par les lampes utilisées pour la désinfection.

Tous les composés chimiques, dissous ou en suspension, présents dans l'eau, et absorbant aux longueurs d'onde UV, peuvent interférer sur l'efficacité de la désinfection par ce procédé. C'est le cas des matières en suspension, de la turbidité, des matières organiques d'origine naturelle, de certains ions (nitrate, nitrite), et de certains éléments minéraux (fer) et composés organiques qui peuvent donner lieu à des réactions de photolyse et générer des sous-produits indésirables. L'irradiation UV d'une eau contenant un oxydant résiduel (chlore, dioxyde de chlore, ozone...) entraîne des réactions secondaires photochimiques susceptibles de donner des composés indésirables.

2.3.1.1. Photolyse des ions nitrate et nitrite

Les ions nitrate et nitrite se caractérisent par une forte absorption des rayonnements UV à des longueurs d'onde inférieures à 230 nm (figure 14), (Mack et Bolton, 1999).

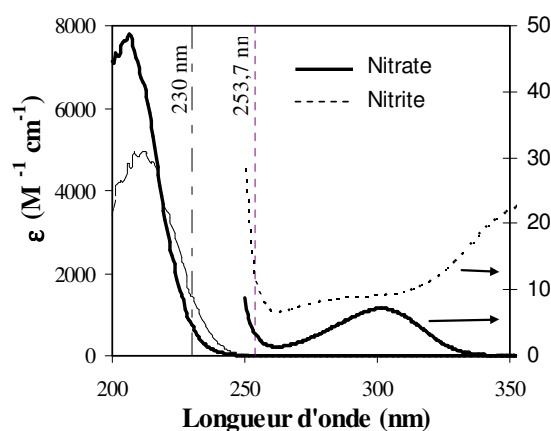


Figure 14 : Spectres d'absorption des rayonnements UV/Visible des ions nitrate et nitrite (Mack et Bolton, 1999)

En conséquence, les ions nitrite et nitrate :

- absorbent fortement les rayonnements UV aux longueurs d'onde émises par les lampes à vapeur de mercure à moyenne pression, en particulier inférieures à 230 nm (à titre d'exemple, 50 mg/L d'une solution de nitrates génèrent une absorbance de l'ordre de 1,5/cm à 230 nm);
- n'absorbent que très peu les rayonnements UV à 253,7 nm, longueur d'onde d'émission ultra-majoritaire des lampes à vapeur de mercure à basse pression ($\epsilon_{253,7 \text{ nm}} < 15 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ pour NO_2^- et NO_3^-).

La photolyse des ions nitrate (Golstein et Rabani, 2007) mène à la formation d'ions nitrite NO_2^- et d'oxygène (O_2) qui sont les produits finaux d'un ensemble de réactions : la première étape consiste en la photo-isomérisation de l'ion nitrate NO_3^- avec formation de l'ion peroxy-nitrite ($\text{ONOO}^-/\text{ONOOH}$), et dissociation de l'ion NO_3^- avec formation des radicaux NO_2° et OH° . Ensuite un mécanisme réactionnel complexe fait intervenir des espèces instables comme des oxydes d'azote (NO° , N_2O_3 , N_2O_4) et des radicaux hydroperoxyde ($\text{HO}_2^\circ/\text{O}_2^\circ$) qui réagissent pour redonner des ions nitrite, des ions nitrate et de l'oxygène.

La photolyse des ions nitrite présents initialement dans l'eau ou celle de ceux formés lors de la photolyse des ions nitrate conduit également à la formation d'oxyde d'azote (NO°) et de radicaux hydroxyle (HO°) (Mack et Bolton, 1999). Ceux-ci initient ensuite des réactions similaires à celles se déroulant lors de la photolyse des ions nitrate.

Globalement, la photolyse des ions nitrate et nitrite, en l'absence de composés organiques et à des longueurs d'onde inférieures à 230 nm, amène la formation de composés instables en milieu aqueux de type nitrite, oxydes d'azote, radicaux hydroxyle qui se recombinent pour redonner les composés originels. Des réactions sont possibles entre ces radicaux et des composés organiques (lorsqu'ils sont présents) mais sont peu probables aux doses de rayonnements UV recommandées en désinfection.

2.3.1.2. Photolyse d'autres composés minéraux

Certains composés minéraux qui absorbent fortement dans l'UV gênent l'action désinfectante des rayonnements UV, mais peu de données existent dans la littérature scientifique concernant la formation potentielle de sous-produits indésirables.

En particulier, l'ion ferreux est connu pour absorber fortement dans l'ultraviolet et donc pour influencer l'efficacité de l'irradiation UV. Les ions ferreux présentent un grand nombre de bandes d'absorption. Aux longueurs d'onde utilisées pour la désinfection de l'EDCH se produisent, même à des teneurs inférieures aux références de qualité, l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique qui précipite sous forme $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et celle du manganèse en oxyde de manganèse. Ces oxydes et hydroxydes se déposent non seulement sur les gaines des lampes en diminuant alors fortement l'efficacité de la désinfection, mais également sur les radiomètres. C'est la raison pour laquelle le nettoyage et l'entretien régulier de ces surfaces est indispensable.

2.3.1.3. Photolyse des composés organiques

Les composés organiques présents dans les eaux à traiter peuvent subir une photolyse lors de l'étape de désinfection UV. Cette photolyse n'est possible que si la molécule considérée présente des groupements chimiques capables d'absorber les photons (chromophores) émis par la (ou les) radiations de la (ou des) lampes UV. Dans le domaine des rayonnements UV utilisés en désinfection, ce sont donc en premier lieu les molécules présentant des groupements aromatiques ou des liaisons

doubles ou triples, avec un fort caractère de conjugaison, qui pourront subir des photolyses (tableau VI). A l'inverse, les molécules aliphatiques n'absorberont que très peu les radiations UV. Kim et Tanaka, 2009, ont par exemple montré que les substances contenant des groupements amides du type R-CON-R₂, étaient très peu photosensibles, même si elles comportent un groupement aromatique (tableau VII). Par ailleurs, leur étude révèle également que certains résidus de médicaments présentent une sensibilité importante vis-à-vis des rayonnements UV (exemple le kétoprofène, tableau VII).

Tableau VI : Exemples de groupements chromophores dans le domaine de longueurs d'onde 220-350nm (d'après Kowalski, 2009)

Groupement	λ (nm)	ϵ (en l.mol ⁻¹ .cm ⁻¹)
Amine N-H	220	800
Carbonyle C=O	280	12
Azo N=N	350	11
Imine C=N	240	120
Nitroso -N=O	300	100
Nitrate -ONO ₂	270	12
Nitro -NO ₂	271	18,6
Nitrite -ONO	218,5	1120
Sulfoxyde S=O	210	1500

La présence de groupements chromophores ne suffit pas à interpréter la photosensibilité des molécules. La structure de la molécule va conditionner les valeurs de deux paramètres importants pour les réactions de phototransformation directe :

- le coefficient d'extinction molaire (ϵ) de la molécule considérée, aux longueurs d'onde d'irradiation émises par la lampe. Plus ce coefficient est élevé, plus le composé est susceptible d'absorber les radiations UV émises, et donc plus il est apte à former des sous-produits ;
- le rendement quantique de photolyse (Φ) de la molécule considérée. Les rendements quantiques sont en général indépendants de la longueur d'onde d'irradiation (Verhoeven, 1996). Toutefois, des composés dont la structure chromophore est dérivée du phénol tels que les hormones estrogéniques -comme le 17- α -éthynyl-œstradiol-, présentent des rendements quantiques de photo-ionisation qui augmentent lorsque les longueurs d'onde d'irradiation diminuent (Grabner *et al.*, 1977 ; Jin *et al.*, 1995).

De plus, la présence simultanée de précurseurs de radicaux (matière organique, ions nitrate, ...) peut donner lieu à des réactions de phototransformation indirecte. En effet, sous l'action d'irradiations UV - même à 400 J/m²-, la matière organique est « excitée », ce qui aboutit à la production d'états triplets excités et de radicaux oxydants tels que les radicaux hydroxyle, les radicaux carbonates et de dioxyde d'azote (Canonica *et al.*, 2008). Ces radicaux sont des espèces chimiques très oxydantes qui peuvent induire une transformation des molécules organiques. Il existe également des risques de réaction entre les ions nitrate et nitrite « excités » et ces composés organiques sous rayonnements UV. En présence de composés organiques, la photolyse des ions nitrate et nitrite, à des longueurs d'onde inférieures à 230 nm, amène la formation de composés instables en milieu aqueux (de type peroxy-nitrate, oxydes d'azote, radicaux hydroxyle) qui sont susceptibles de conduire à la formation de composés organiques nitrés et nitrosés (Lee et Yoon, 2007 ; Vione *et al.*, 2007 ; Canonica *et al.*, 2008). Les lampes à vapeur de mercure à basse pression émettent une partie de leurs rayonnements à 185 nm, lorsqu'ils ne sont pas filtrés de manière adéquate. Cette longueur d'onde permet la

Tableau VII : Exemples de rendements de photolyse UV de quelques composés organiques en fonction de la dose appliquée

	composé	ϵ (L.mol ⁻¹ cm ⁻¹) à 254 nm, pH 7	Lampe	C ₀ (μ g/L)	400 J/m ²	600 J/m ²	1000 J/m ²	1200 J/m ²	2300 J/m ²	référence	
Pesticides	isoproturon	5944	BP (15 W)	1000	0,2 %	0,3 %	0,5 %	0,7 %	1,3 %	Sanches <i>et al.</i> , 2010	
	alachlore	543			1,0 %	3,2 %	5,4 %	6,5 %	12,5 %		
	atrazine	3860			3,0 %	4,5 %	7,5 %	9,0 %	17,4 %		
	diuron	16162			5,2 %	7,8 %	13,0 %	15,7 %	30,0 %		
	chlorfenvinphos	8656			9,0 %	13,5 %	22,5 %	27,0 %	51,7 %		
	etridiazole	720	BP (5W)	350	10,0 %	-	-	-	-	Liu <i>et al.</i> , 2009	
pharmaceutiques	iopromide	-	BP (15W)	-	15 %, 5,2 %	-	-	-	-	Canonica <i>et al.</i> , 2008	
	17- α éthinyl-oestradiol	-		-	0,4 %, 0,7 %	-	-	-	-		
	sulfaméthoxazole	7345		MP (150W)	-	15 %, 7,4 %	-	-	-		-
	diclofénac	3465	BP (8W)	5 à 137	-	27 %, 26 %	-	-	-	-	Kim et Tanaka, 2009 *Kim <i>et al.</i> , 2009 (plus de 30 composés suivis)
		-			-	-	-	90 %*	97 %		
		carbamazépine			6072	-	-	-	-	8 %	
		kétoprofène			15155	90 %*	-	-	-	97 %	
		antipyrine			6626	-	-	-	-	83 %	
		isopropylantipyrine			7255	-	-	-	-	78 %	
		fénoprofène			800	-	-	-	-	70 %	
		naproxéne			3961	-	-	-	-	22 %	
		indométhacine			14848	-	-	-	-	20 %	
		acetaminophène			4218	-	-	-	-	17 %	
acide méfénamique	4633	-	-	-	-	9 %					
ethenzamide	743						4 %				

Tableau VIII : Efficacité comparée des lampes basses pression et moyenne pression sur i) l'inactivation et ii) la capacité de reviviscence de quelques microorganismes

(L : en présence de lumière = photoréparation ; O = à l'obscurité = « dark-repair »)

Micro-organismes	Type de lampes	Dose UV (en J/m ²)	N ₀ (CFU/mL)	valeur après irradiation (en log)	Type de réparation	valeur après réparation (en log)	Temps minimal de réparation	Remarque	Source bibliographique		
<i>Escherichia coli</i> O157:H7	BP	50	10 ⁷ à 10 ⁹	4,5 (±0,2)	L	3,4 (±0,1)	30 minutes	Le phénomène de réparation n'a été suivi que sur 4h. La concentration initiale en micro-organismes est imprécise	Zimmer-Thomas <i>et al.</i> , 2007		
					O	1,4 (±0,0)	240 minutes				
		80		5,1 (±0,3)	L	2,9 (±0,2)	30 minutes				
					O	0,7 (±0,1)	240 minutes				
	200	5,1 (±0,1)		L	0,4 (±0,0)	240 minutes					
				O	-0,2 (±0,2)	240 minutes					
	400	5,3 (±0,1)		L	0,5 (±0,2)	240 minutes					
				O	-0,3 (±0,3)	240 minutes					
	MP	50		6,4 (±0,2)	L	0,7 (±0,1)	240 minutes				
					O	0,1 (±0,1)	240 minutes				
80		6,6 (±0,4)	L	0,9 (±0,2)	240 minutes						
			O	0,3 (±0,3)	240 minutes						
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	BP	400	6,4.10 ⁵	4,1 (±0,1)	L	0 (±0,1)	8h	La réparation s'effectue par pallier : elle débute après 8h, stagne puis reprend après 36h	Süss <i>et al.</i> , 2009		
			1,1.10 ⁷	5,9 (±0,3)	L	1,2 (±0,2)	8h				
			3,4.10 ⁷	7,1 (±0,1)	L	2,7 (±0,1)	8h				
			5,9.10 ⁷	4,0 (±0,2)	L	3,7 (±0,1)	8h				
		600	6,4.10 ⁵	5,4 ± 0,2	L	0 (±0,1)	8h				
			1,1.10 ⁷	6,3 (±0,5)	L	1,6 (±0,3)	8h				
			3,4.10 ⁷	7,5 (±0,2)	L	3,0 (±0,2)	8h				
			5,9.10 ⁷	5,0 (±0,1)	L	2,4 (±0,1)	8h				
		100-600				O				>6h	Jüngfer <i>et al.</i> , 2007

<i>Enterococcus faecium</i>	BP	400	3,3.10 ⁶	6,3 (±0,1)	L	0 (±0,1)	>66h	Pas de photoréactivation significative	Süss <i>et al.</i> , 2009	
				5,9 (±0,2)	L	0 (±0,1)	>66h			
				4,5 (±0,1)	L	0,3 (±0,3)	>66h			
				3,5 (±0,2)	L	0,6 (±0,2)	>66h			
				7,1 (±0,2)	L	0,3 (±0,2)	>66h			
				7,3 (±0,2)	L	0,9 (±0,2)	>66h			
				5,0 (±0,3)	L	-0,7 (±0,2)	>66h			
				3,7 (±0,1)	L	-0,2 (±0,4)	>66h			
					O		>6h			
					O		<2h			
<i>Caulobacter crescentus</i>	BP	100-600			O		<2h		Jüngfer <i>et al.</i> , 2007	
<i>Aquabacterium commune</i>	BP	100-600			O		<2h	Pas de "dark-repair" si Dose UV >200 J/m ²		
<i>Bacillus subtilis</i>	BP				O		>40 minutes			
<i>Mycobacterium smegmatis</i>	BP				O		> 5h		Papavinasundaram <i>et al.</i> , 2001	
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	BP				O		> 24h			
<i>Mycobacterium terrae</i>	BP/MP	50-400			L		<30 minutes	Aucun "dark-repair" quelle que soit la dose UV appliquée	Bohrerova et Linden, 2006	
<i>Coliphage MS2</i>	BP/MP				L	0		Aucune réactivation possible pour MS2		
<i>Adénovirus2</i>	BP	300-900			O	0				Shin <i>et al.</i> , 2009
	MP				L	1,0			Réactivation observée uniquement avec lampe BP	

formation de radicaux hydroxyle (HO°) à partir des molécules d'eau. De manière évidente, une augmentation de la dose UV, ou bien une hétérogénéité de la répartition des doses dans le réacteur peut augmenter le risque de réactions photochimiques indésirables.

De plus, le positionnement du traitement UV dans la filière de traitement a une importance capitale : dans les cas où la désinfection par rayonnements UV serait appliquée sur une eau ayant subi un traitement préalable au chlore (Zheng *et al.*, 1999), la présence de chlore libre résiduel et de chlore combiné dans l'eau, peut favoriser la formation de sous-produits indésirables (trihalométhanés, acides haloacétiques) via la génération de radicaux halogénés très réactifs.

Peu d'études ont été menées à ce jour avec des lampes moyennes pression. Il semble néanmoins très probable que ces lampes qui produisent des longueurs d'onde dans un domaine étendu (200 à 600 nm), ont la capacité de photolyser des molécules photosensibles. Il est donc nécessaire de limiter la dose délivrée par ce type de lampe, mais également celle délivrée par les lampes à basse pression à haute énergie.

2.3.2. Réparation de l'ADN

2.3.2.1. Mécanismes de réparation

Les lésions de l'ADN générées par les rayonnements UV peuvent être réparées par certains micro-organismes selon deux modalités :

- la photoréactivation qui est un mécanisme de réparation de l'ADN, dépendant de la lumière aux longueurs d'onde de 310 à 490 nm ;
- le phénomène de « dark-repair » qui est un mécanisme se produisant indépendamment de la lumière.

Ces mécanismes sont détaillés en annexe C.

2.3.2.2. Illustration des phénomènes de réparation

Le phénomène de « dark-repair » est majoritairement observé lorsque des lampes à basse pression sont utilisées et ceci, quelle que soit la dose UV appliquée dans la gamme 100 à 600 J/m^2 (Zimmer-Thomas *et al.*, 2007). Ce phénomène, comme celui de la photoréactivation, est toutefois directement corrélé à cette dose (taux de réactivation inversement proportionnel à la dose appliquée), mais également à la densité initiale de micro-organismes. Plus cette densité est importante, plus le taux de réactivation est important. Ceci est particulièrement vérifié lorsque la concentration initiale est supérieure à 10^7 UFC/mL.

Le rôle de la densité initiale de micro-organismes peut s'expliquer par (Süss *et al.*, 2009) :

- la transmittance du milieu qui est diminuée lorsque la population bactérienne est augmentée induisant une diminution de la dose d'irradiation perçue individuellement par chaque bactérie ;
- des mécanismes de réparation de l'ADN qui seraient facilités par des réactions intercellulaires.

Un effet de la température a également été noté par certains auteurs : les phénomènes de réactivation à la lumière ou ceux de réactivation à l'obscurité sont favorisés à température élevée (30 °C) (Salcedo *et al.*, 2007).

Le phénomène de photoréparation est toujours bien supérieur à celui du « dark-repair » et peut s'initier en moins de 30 minutes. Le phénomène de « dark-repair » peut être initié dans des temps variant entre 40 minutes (*Bacillus subtilis*), 2 h (*Pseudomonas aeruginosa*), 5h (*Mycobacterium smegmatis*), et même 24 h après la fin de l'irradiation (*Mycobacterium tuberculosis*) (Jüngfer *et al.*, 2007).

Ces phénomènes de réactivation sont fortement dépendants des micro-organismes (tableau VIII). Certains auteurs suggèrent que ces différences pourraient s'expliquer par un comportement différent entre bactéries Gram négatives et positives.

Il semble donc que les lampes à basse pression et à moyenne pression soient tout aussi efficaces en termes de lésions d'ADN (et donc en termes d'abattement), mais que le phénomène de réparation de ces lésions serait plus important avec les lampes à basse pression. Ainsi, les lampes à moyenne pression endommageraient non seulement l'ADN, mais s'attaqueraient également à des protéines essentielles pour la réparation et/ou pour la réplication des brins d'ADN lésés (Shin *et al.*, 2009).

De nombreuses bactéries disposent des enzymes capables de réparer les lésions de l'ADN à la lumière ou indépendamment de la lumière. Les virus n'ont pas de telles enzymes, toutefois le matériel génétique des adénovirus peut être réparé grâce aux enzymes des cellules hôtes. Quant au parasite *Cryptosporidium*, Morita *et al.*, 2002, ont mis en évidence la possibilité de photoréparation et de « dark repair » de l'ADN mais avec la perte de l'infectiosité chez l'animal hôte. Des conclusions similaires sont données pour *Giardia*, toutefois des réparations après exposition à des faibles doses ont été observées.

2.4. Conclusions

Les traitements de désinfection par rayonnements ultraviolets nécessitent, selon les classes de micro-organismes, des doses d'irradiation de l'ordre de 300 à 400 J/m². Si la dose est plus faible, les micro-organismes ne seront pas « tués » et pourront s'auto-réparer. À 400 J/m² une efficacité d'inactivation de l'ordre de 4 log est reconnue vis-à-vis des bactéries et des protozoaires. Par contre, pour les virus, il peut exister des résistances plus élevées comme, par exemple, dans le cas des adénovirus pour lesquels les doses d'irradiation nécessaires pour obtenir un abattement de 4 log sont de l'ordre de 1500 à 1600 J/m².

Par ailleurs, ces rayonnements couplés à d'autres oxydants peuvent induire des réactions secondaires : ozone-UV, eau oxygénée-UV, dioxyde de chlore-UV. Le couplage hypochlorite-UV génère de l'oxygène singulet et des radicaux libres halogénés très réactifs qui conduit aussi à des réactions secondaires.

Aussi, ces traitements couplés ne sont pas autorisés pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, à l'exception des eaux souterraines ne contenant que des solvants chlorés à 1 ou 2 atomes de carbone.

3. Contexte réglementaire et normatif

Les réglementations française, européenne et des pays tiers ainsi que les normes qui y sont souvent associées sont très importantes pour ce qui concerne les traitements de désinfection par rayonnements UV de l'eau destinée à la consommation humaine. L'annexe D présente les différentes normes et réglementations qui ont été adoptées pour l'évaluation et la mise sur le marché des réacteurs UV.

3.1. Conditions de mise sur le marché français des réacteurs UV pour le traitement des EDCH

3.1.1. Réglementation applicable aux réacteurs UV

Les réacteurs UV de type à basse pression figurent dans la circulaire du 28 mars 2000 parmi les groupes de produits et procédés de traitement pouvant être mis sur le marché pour la désinfection des EDCH. Cette circulaire renvoie à la circulaire DGS/PGE/1-D n°52 du 19 janvier 1987 en ce qui concerne les conditions d'emploi préconisées. La mise sur le marché de ces dispositifs se fait sans examen ni autorisation individuelle et les dispositifs de traitement par rayonnements UV peuvent être mis sur le marché pour le traitement des EDCH dès lors que les lampes UV mises en œuvre sont de type à basse pression et que la dose d'irradiation est d'au moins 250 J/m². A noter que dans de telles conditions, l'utilisation vaut pour un traitement de désinfection bactéricide classique et que ces conditions d'emploi ne permettent pas de mettre en avant *de facto* une quelconque efficacité vis-à-vis des parasites (*Cryptosporidium* et *Giardia* notamment), ou des virus.

Toutefois les dispositions fixées à l'époque sont devenues partiellement obsolètes et dans le cas où un industriel souhaite mettre sur le marché un réacteur UV :

- équipé de lampes à vapeur de mercure moyenne pression ;
- et/ou destiné à inactiver des parasites ou des virus ;

alors, ce réacteur est considéré comme un dispositif "innovant" au regard des dispositions spécifiques actuelles. Sa mise sur le marché relève alors des dispositions de l'article R.1321-50-IV du code de la santé publique précité.

3.1.2. Historique de l'évaluation des dossiers d'autorisation de mise sur le marché de réacteurs UV

Depuis sa création, l'Afssa, dont les missions sont confiées à l'Anses depuis le 1^{er} juillet 2010, a en charge l'évaluation des dossiers de demande d'autorisation pour la mise sur le marché de réacteurs UV mettant en œuvre des lampes autres que des lampes à vapeur de mercure à basse pression et revendiquant une action plus large que la désinfection bactérienne. A la date du 19 avril 2010, 27 demandes d'avis pour l'agrément de réacteurs UV ont été soumises à l'Afssa.

3.2. Autres références réglementaires ou normatives

Afin de connaître les exigences réglementaires pour la mise sur le marché des réacteurs UV pour la désinfection des EDCH dans les pays membres de l'union européenne, un questionnaire a été transmis aux représentants des états membres participant au groupe ENDWARE. Dix pays ont répondu dont l'Allemagne, l'Autriche, le Royaume-Uni et l'Irlande qui ont fixé des exigences spécifiques pour la mise sur le marché des réacteurs UV.

D'autres pays ont également des systèmes de reconnaissance des réacteurs UV pour leur mise sur le marché, c'est le cas de la Norvège, la Suisse, la Nouvelle-Zélande, les USA et le Québec.

Enfin, l'OMS propose dans les lignes directrices sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine des doses de rayonnement UV permettant l'inactivation de différents micro-organismes.

Tous ces éléments sont présentés dans l'annexe D.

3.3. Contexte normatif

Les dispositions des différents pays reposent sur les documents suivants ;

- Norme allemande DVGW Technical Standard W294 (1 à 3) intitulée : Appareil de désinfection par rayonnements UV dans l'approvisionnement en eau ; partie 1 : exigences relatives à la qualité, au fonctionnement et à l'exploitation ; Partie 2 : examen de la qualité, du fonctionnement et de l'efficacité de désinfection ; Partie 3 : fenêtres de mesure et radiomètres pour la surveillance radiométrique d'appareils de désinfection par rayonnements UV ; exigences, examen et étalonnage (juin 2006) ;
- Norme autrichienne OENORM M5873-1 et-2 (MP et BP) intitulée : Appareil de désinfection de l'eau mettant en œuvre des rayonnements UV, exigences et essais ; Partie 1 : appareils à lampe à vapeur de mercure basse pression (mars 2001) ; Partie 2 : appareils à lampe à vapeur de mercure moyenne pression (aout 2003) ;
- Guide américain NWRI-AWWARF intitulé : lignes directrices pour la désinfection par rayonnements UV des eaux destinées à la consommation humaine et pour la réutilisation de l'eau (seconde édition 2003) ;
- Norme américaine NSF-ANSI 55 intitulée : appareils à rayonnements UV pour le traitement de la contamination microbiologique de l'eau (2007) ;
- Protocole US-EPA intitulé UVGM présentant des lignes directrices pour la validation des réacteurs à rayonnements UV dans le cadre de la LT2ESWTR (mis à jour en novembre 2006).

La norme européenne NF EN 14897 /IN1 +A1 pour les dispositifs à l'intérieur des habitations n'a pas été prise en compte bien qu'elle soit très proche des exigences des normes européennes, allemande et autrichienne.

4. Preuves d'innocuité et d'efficacité

4.1. Innocuité des procédés mettant en œuvre des réacteurs UV

Les matériaux entrant en contact avec l'eau lors de son passage à travers le réacteur UV ne doivent pas être susceptibles de laisser migrer des molécules indésirables et de dégrader sa qualité. Des exigences sont requises pour tout matériau ou support de traitement entrant au contact de l'eau. De plus dans le cas des réacteurs UV les matériaux sont soumis à des conditions qui ne sont pas classiquement rencontrées lors de la distribution d'eau. Ainsi les preuves de conformité relatives aux matériaux organiques ne comprennent pas de test de migration en étant soumis à des rayonnements UV et à une température élevée.

Actuellement, seul l'acier inoxydable est utilisé pour fabriquer l'enveloppe des réacteurs UV. Si un autre matériau est utilisé, son inertie aux rayonnements UV devra être prouvée.

Les produits d'entretien mis en œuvre pour la maintenance des réacteurs ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'eau. Les produits et systèmes de nettoyage actuellement utilisés pour l'entretien des réacteurs sont :

- Nettoyage chimique en continu ou ponctuel avec les produits suivants :
 - o acide phosphorique ;
 - o vinaigre blanc (uniquement pour éliminer le carbonate de calcium) ;
 - o Un acide dicarboxylique en milieu acide.
- Nettoyage mécanique automatique.

Une procédure de rinçage doit être définie et les preuves de l'efficacité du rinçage doivent être apportées.

Afin de s'assurer que les longueurs d'onde responsables de la génération de sous-produits dangereux sont bien filtrées par la gaine de quartz dopé, il convient de disposer des spectres d'émission de la lampe seule et équipée de sa gaine. De plus si le quartz dopé ou le filtre mis en œuvre entre en contact avec l'eau, il convient de s'assurer que l'élément dopant est connu et qu'il n'est pas susceptible de migrer dans l'eau qui entre à son contact.

4.1.1. Modélisation photonique

La modélisation photonique (*cf.* annexe A §2) permet de connaître le profil de répartition de la dose que les particules reçoivent dans le réacteur. Cette répartition permet d'estimer le pourcentage de formation de sous-produits jugés indésirables.

Lors de l'utilisation des modèles disponibles sur le marché, le modélisateur doit entrer un certain nombre de données, dont le nombre de particules (assimilées aux micro-organismes) et la transmittance (que ce soit de l'eau et du quartz) qui sont des paramètres essentiels. Le choix du modèle de turbulence (Liu *et al.*, 2007) a également un impact sur les prévisions d'inactivation et la dose équivalente de réduction (Munoz *et al.*, 2007). A ce jour les modèles ne prennent pas en compte le vieillissement des lampes et la formation de dépôts sur les gaines qui dépend de la composition physico-chimique de l'eau.

En aucun cas, la méthodologie « computational fluid dynamics (CFD) » ne doit être utilisée pour vérifier l'efficacité de désinfection d'un réacteur UV. Cette étape de modélisation ne doit être réservée qu'à l'étape de conception du réacteur, même si certains auteurs indiquent que la modélisation pourrait apporter des informations à la fois sur le dessin du réacteur et sur l'efficacité du procédé.

Seuls les tests biosimétriques peuvent valider l'efficacité d'un réacteur UV.

Ceci est souligné par Pan et Orava, 2007, qui indique que « les simulations CFD pourraient ne pas être un outil prédictif assez précis du taux de fluence dans un réacteur UV du fait que *l'efficacité électrique* (définie comme étant l'énergie électrique réellement utile pour l'inactivation des bactéries) est incertaine avec les modèles actuels, et que seule *l'efficacité mécanique* des réacteurs peut être prédite avec les simulations CFD ».

4.2. Preuves d'efficacité

4.2.1. Exigences des normes

Les préconisations en termes d'efficacité sont les suivantes pour les trois référentiels existants. :

- US-EPA (USA) qui utilise la biosimétrie avec comme micro-organisme test le phage MS2. Elle fixe dans son règlement STWR l'objectif de 400 J/m² pour un abattement de 4 log de *Cryptosporidium* et *Giardia* et de 0,5 log de virus (adénovirus) ;
- DVGW 2006 (Allemagne) qui exige que l'efficacité de désinfection d'un réacteur UV corresponde à une dose de réduction équivalente (DRE) d'au moins 400 J/m² rapporté à un rayonnement de longueur d'onde 253,7 nm ;
- Les normes OENORM 5873-1 et -2 (Autriche) qui exigent, comme la norme allemande, qu'un réacteur UV délivre une DRE de 400 J/m² à une longueur d'onde de 253,7 nm. À cette dose, une réduction d'au moins 4 log des bactéries, virus et protozoaires pathogènes transportés par l'eau est assurée en accord avec l'état de la science.

4.2.2. Protocoles d'essai

La dose d'irradiation nécessaire à l'inactivation de micro-organismes ne peut pas être déterminée *a priori* car elle dépend de la qualité de l'eau à traiter (turbidité notamment) et des configurations géométrique et hydrodynamique du réacteur utilisé. C'est pourquoi elle est déterminée de façon expérimentale par biosimétrie qui est une méthode standardisée utilisant des micro-organismes test dont la sensibilité aux rayonnements UV a été étalonnée.

Selon les référentiels, les dispositifs UV utilisés pour la désinfection des EDCH doivent présenter un potentiel de désinfection correspondant à une dose UV d'au moins 400 J/m². Cela devrait être vérifié avec un micro-organisme présentant une réduction de 4 log pour une dose de 400 J/m² en irradiation statique. Cependant les micro-organismes faciles à produire et sans risque lors de leur manipulation en laboratoire ne permettent pas toujours de vérifier ces abattements.

Principe de la biosimétrie :

La détermination expérimentale de la Dose de Réduction Équivalente (DRE) est réalisée en 2 étapes :

- établissement d'une courbe de réponse à la dose de rayonnements UV pour un micro-organisme test ou biosimètre, choisi en fonction de sa résistance, dans des conditions d'exposition statique maîtrisées ;
- établissement de la DRE après exposition de ce micro-organisme dans le réacteur UV en condition dynamique. La DRE est la dose pour laquelle le même niveau d'inactivation est obtenu dans l'essai grandeur réelle qu'en condition statique de laboratoire.

La dose validée est obtenue en appliquant à la DRE un facteur correctif qui prend en compte les biais et les incertitudes expérimentales.

4.2.2.1. Choix des micro-organismes tests

La désinfection à l'aide de rayonnements UV est préconisée vis-à-vis notamment de protozoaires fécaux présentant des formes de dissémination résistantes tels les kystes de *Giardia* et les oocystes de *Cryptosporidium* ou encore les virus. La manipulation de ces agents pathogènes, en fortes concentrations, peut être dangereuse pour les manipulateurs dans le cadre d'essai de validation, d'où le recours à des micro-organismes susceptibles d'être présents dans l'eau, non pathogènes et dont la sensibilité aux rayonnements UV est similaire aux micro-organismes cibles. Ces micro-organismes tests doivent pouvoir être produits facilement en grande quantité, cultivés et dénombrés rapidement et avoir des caractéristiques stables dans le temps. Il faut également prendre en compte le type de courbe d'inactivation du micro-organisme qui peut être diphasique en présentant une phase de latence initiale (- réparation photochimique après irradiation à faible dose ou - concept d'inactivation par sites multiples ou par frappes multiples). La sensibilité aux rayonnements UV doit être évaluée dans la partie linéaire de la courbe d'inactivation comprise entre les changements de pente, c'est le cas par exemple des spores de *Bacillus subtilis*.

Parmi les micro-organismes candidats, les bactériophages MS2 et les spores de *Bacillus subtilis* présentent une résistance sensiblement plus élevée que celles de *Giardia* et *Cryptosporidium* (tableau IX).

Tableau IX : liste de micro-organismes préconisés pour l'évaluation de l'efficacité de désinfection des réacteurs à rayonnements UV et leur sensibilité aux rayonnements UV (d'après USEPA, 2006)

Micro-organisme	Dose UV (J/m ²) pour atteindre le log d'abattement indiqué			
	1 log	2 log	3 log	4 log
<i>Bacillus subtilis</i>	280	390	500	620
Phage MS2	160	340	520	710
Phage Q β	109	225	346	476
Phage PRD-1	99	170	240	300
Phage B40-8	120	180	230	280
Phage ϕ x174	22	53	73	110
<i>E.coli</i>	30	48	67	84
Phage T7	36	75	118	166
Phage T1	≈ 50	≈ 100	≈ 150	≈ 200

Les référentiels préconisent l'utilisation des micro-organismes tests suivant :

- DVGW : spores de *Bacillus subtilis* ATCC 6633 ;
- ÖNORM 5873 – 1 et 2 : spores de *Bacillus subtilis* ATCC 6633 ;
- US EPA 2006 : bactériophage MS2 ATCC 15597-B1.

4.2.2.2. Essais statiques en laboratoire : étalonnage à l'aide du micro-organisme test

La détermination de la sensibilité aux rayonnements UV du micro-organisme test est réalisée en mode statique, dans des conditions de laboratoire définies, à l'aide d'un appareil à faisceau collimaté qui génère un rayonnement mesurable avec précision.

Le dispositif comprend un boîtier horizontal en matière opaque non réfléchissante avec une source de rayonnements UV calibrée et de spectre d'émission connue. Le plus souvent, il s'agit d'une lampe à rayonnements UV à basse pression émettant à 254 nm. La source doit émettre un rayonnement constant ce qui nécessite un stabilisateur de tension ou un dispositif de régulation électronique. Le

rayonnement émis par la source traverse un tube collimateur, en matière opaque non réfléchissante, orienté vers le bas. Il est envoyé sur une suspension de micro-organismes contenue dans une coupelle cylindrique de type boîte de Pétri en matériau absorbant les rayonnements UV pour éviter des réflexions. Le champ d'éclairement du faisceau collimaté couvre entièrement la surface de la coupelle et est perpendiculaire à la surface plane et non agitée de l'échantillon. La hauteur du liquide est comprise entre 0,5 et 2 cm.

L'étalonnage de la sensibilité du micro-organisme test est réalisé avec la même eau que celle utilisée dans les essais grandeur nature. Les 2 types d'essais statique et dynamique sont menés dans la même journée pour limiter les variations liées à la production du micro-organisme.

L'énergie UV est mesurée par un radiomètre de référence.

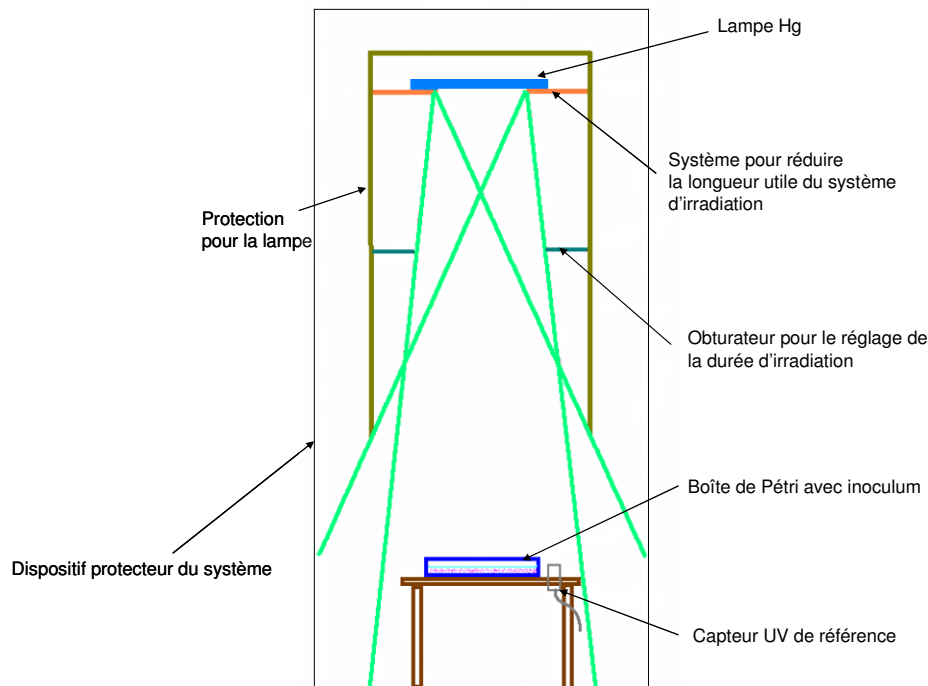


Figure 15 : Schéma d'un dispositif d'irradiation de laboratoire (OENORM, 2001)

La courbe d'inactivation du micro-organisme test en fonction de la dose de rayonnements UV reçue est obtenue en exposant des suspensions, de concentrations de l'ordre de 10^6 à 5.10^6 UFP (pour les virus) ou UFC/mL (pour les bactéries) et réparties dans des boîtes de Pétri. La transmittance de la suspension doit être supérieure à 90 % à 254 nm mesurée dans une cuve en quartz de 1 cm de longueur. Pour l'évaluation, seules les boîtes comportant un nombre de colonies comprises entre 20 et 200 doivent être dénombrées.

A énergie constante (W/m^2), le temps d'exposition (s) est modifié de façon à couvrir un domaine d'exposition étendu de 100 à $800 J/m^2$ avec au moins 6 à 8 doses.

$$D (J/m^2) = I (W/m^2) \times t (s)$$

A partir des données expérimentales

- les doses d'exposition aux rayonnements UV en J/m^2 ,

et

- le facteur de réduction : $\log(N/N_0)$ où N_0 et N sont les concentrations en micro-organismes avant et après exposition aux rayonnements UV,

la courbe d'inactivation du micro-organisme est dérivée de la courbe du facteur de réduction en fonction de la dose. La partie linéaire de la courbe d'inactivation est décrite par la formule suivante :

$$\log(N/N_0) = d + kH$$

avec d : point d'intersection de la droite avec l'axe des ordonnées

k : pente de la droite (m^2/J)

H : dose UV (J/m^2)

Cette courbe d'inactivation à une longueur d'onde de 253,7 nm est validée si elle se situe dans les limites de tolérance définies par les normes précitées.

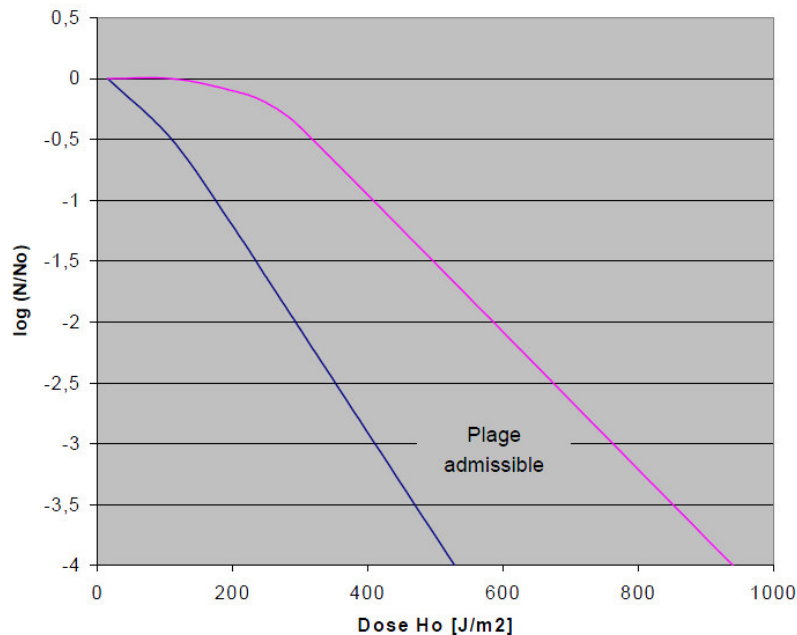


Figure 16 : Plage admissible pour la courbe d'inactivation du biosimètre (OENORM, 2001)

D'autre part, les données issues de l'inactivation du micro-organisme test doivent remplir les critères suivants :

$$\text{à } 100 \text{ J/m}^2 : \quad \log \frac{N}{N_0} \leq -0,2$$

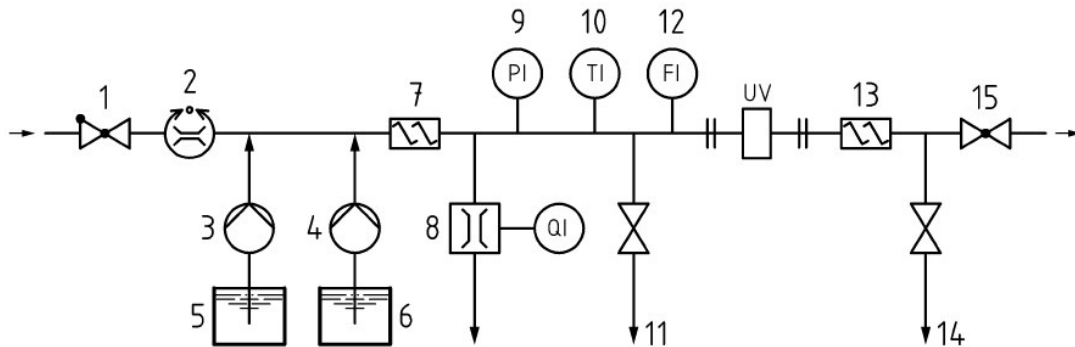
$$\text{à } 400 \text{ J/m}^2 : \quad -1,6 > \log \frac{N}{N_0} \geq -2,6$$

La courbe d'inactivation obtenue sert de référence pour les essais dynamiques décrits ci-après.

4.2.2.3. Essais dynamiques sur banc pilote

Il s'agit de vérifier en grandeur réelle qu'une dose définie (par exemple 400 J/m²) est bien délivrée par le réacteur UV et d'établir les conditions d'utilisation du réacteur. Les paramètres pris en compte sont le débit et la transmittance UV de l'eau, la puissance et l'état des lampes, l'énergie UV, l'encrassement, la configuration hydraulique des tuyauteries et du réacteur.

Le réacteur UV est monté dans un banc pilote sur un site de taille industrielle ou dans un centre spécialisé. L'eau stockée dans un réservoir en amont est distribuée dans un circuit tel que présenté sur la figure 17.



Légende

- | | | | |
|---|--|----|---|
| 1 | Arrivée d'eau avec clapet de non-retour | 9 | Dispositif de mesure de la pression |
| 2 | Vanne de réglage du débit | 10 | Dispositif de mesure de la température |
| 3 | Pompe doseuse, pour thiosulfate de sodium | 11 | Point d'échantillonnage en amont du dispositif à UV |
| 4 | Pompe doseuse, pour biososimètre | 12 | Débitmètre |
| 5 | Solution de thiosulfate de sodium | 13 | Mélangeur statique en aval du dispositif à UV |
| 6 | Biososimètre | 14 | Point d'échantillonnage en aval du dispositif à UV |
| 7 | Mélangeur statique en amont du dispositif à UV | 15 | Vanne d'arrêt |
| 8 | Dispositif de mesure du facteur de transmission des UV dans l'écoulement d'eau | | |

Figure 17 : schéma du montage d'essai (OENORM, 2001)

L'eau utilisée est de l'eau de qualité potable de haute transmittance UV (99%) présentant une turbidité inférieure à 0,1 NFU et des concentrations en fer et manganèse toutes deux inférieures à 10 µg/L. Si nécessaire, le chlore résiduel est neutralisé par du bisulfite de sodium de façon à ne pas influencer la transmittance.

Les absorbeurs UV utilisés pour modifier la transmittance UV de l'eau sont :

- le café lyophilisé,
- le sulfate de lignine,
- des acides humiques.

Les lampes équipant le réacteur doivent avoir fonctionné pendant au moins une centaine d'heures avant les essais.

Le protocole comprend la réalisation de 2 types de tests « H » et « L » conduits chacun dans des conditions de débit maximal, intermédiaire et minimal :

- le test « H » est réalisé à la puissance maximale de la lampe en faisant diminuer la transmittance UV par ajout d'un absorbeur jusqu'à l'obtention d'une énergie donnée soit un éclairement énergétique minimal pour une puissance maximale de la lampe,
- le test « L » est mené à une transmittance UV élevée en faisant varier la puissance de la lampe soit un éclairement énergétique minimal pour la transmittance UV la plus élevée en réduisant la puissance de la lampe. L'émission des rayonnements UV est réglée sur un maximum de 70 % de la puissance rayonnante d'un émetteur neuf.

- Pour une paire de paramètres caractéristiques - éclairement énergétique minimal et débit maximal - il faut, avec 2 variations de réglage de l'éclairage minimal (test « H » et « L ») obtenir une dose de réduction équivalente (DRE) d'au moins 400 J/m² pour l'analyse biosimétrique.

Chaque type d'essai est réalisé en double, au cours de 2 séquences indépendantes.

Le micro-organisme test ou biosimètre est introduit à l'amont du réacteur, dans des conditions définies de fonctionnement, de façon à obtenir une concentration de 10⁶ à 10⁷ UFC/L. Des échantillons d'eau sont prélevés à l'amont (N₀) et à l'aval (N) du réacteur UV à raison de 3 à 5 répliques par condition d'essai à 1 minute d'intervalle. Chaque réplique est analysée en triple exemplaire. La moyenne arithmétique des dénombrements rapportée au facteur de dilution est convertie en logarithme décimal. Le résultat est obtenu en faisant la moyenne logarithmique des répliques dont l'écart type ne doit pas excéder ± 0,2. Le calcul de log N/N₀ détermine la réduction du micro-organisme test obtenue pour chaque condition d'essai.

La dose de réduction équivalente (DRE)

La DRE est obtenue en reportant sur la courbe d'étalonnage dose-réponse obtenue en situation statique, la réduction du micro-organisme test obtenue en situation dynamique.

La DRE de chaque réplique pour chaque condition de fonctionnement peut être calculée à l'aide de l'équation de la relation dose-réponse développée précédemment

$$DRE = -\frac{1}{k} \times \log \left[1 - \left(1 - \frac{N}{N_0} \right)^{10^{-d}} \right]$$

$\frac{N}{N_0}$ = taux d'inactivation du biosimètre

k = perte de sensibilité aux UV (m²/J)

d = distance séparant l'ordonnée à l'origine de la courbe et le zéro dans les courbes d'inactivation des micro-organismes

Tableau X : Exemple de résultats des mesures biosimétriques

Numéro du point d'essai	1	1*	2	2*	3	3*
Paramètre à faire varier	facteur de transmission des UV	puissance de la lampe	facteur de transmission des UV	puissance de la lampe	facteur de transmission des UV	puissance de la lampe
Réglages d'essai	Éclairage énergétique E ₁ au débit q ₁		Éclairage énergétique E ₂ au débit q ₂		Éclairage énergétique E ₃ au débit q ₃	
DRE pour le premier passage J/m ²	405	420	401	425	408	402
DRE pour le deuxième passage J/m ²	417	403	413	416	410	424

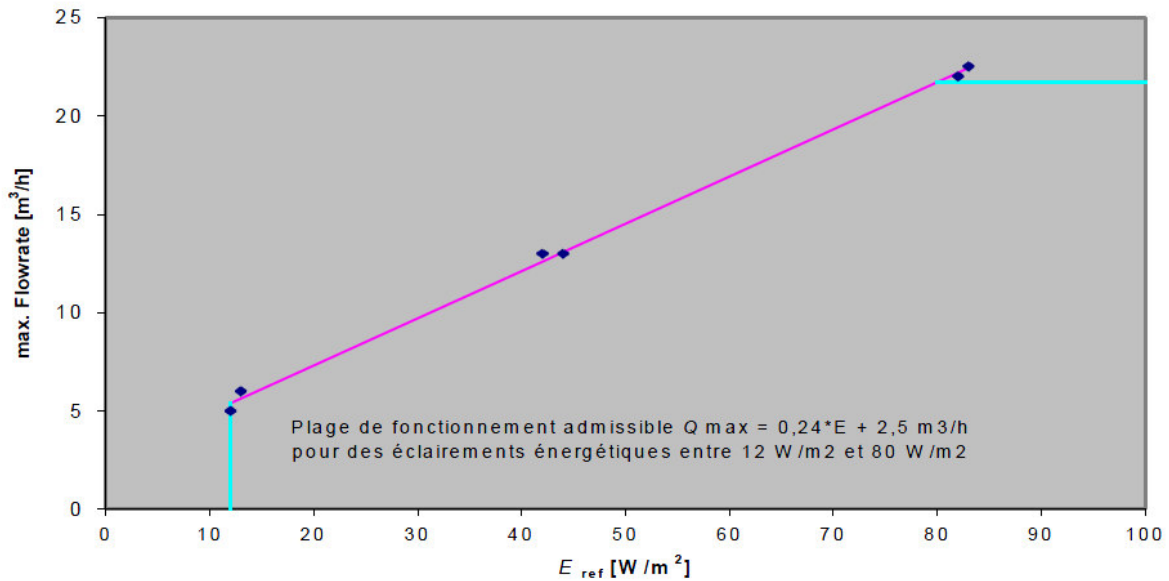


Figure 18 : Exemple de représentation de la plage de fonctionnement admissible : éclairage énergétique minimal et débit maximal (OENORM, 2001)

Les conditions d'utilisation du réacteur UV permettant de délivrer une DRE de 400 J/m² sont obtenues à partir des 2 types de relations suivantes :

- débit admissible en fonction de la transmittance UV,
- puissance minimale de la lampe à respecter en fonction du débit.

5. Technologies émergentes et perspectives technologiques

L'irradiation aux rayonnements UV est en constant développement. Les lampes à vapeur de mercure basse et à moyenne pressions sont les plus utilisées actuellement, mais de nouvelles technologies sont à l'étude. Par exemple se développent les diodes électroluminescentes (DEL ou LED en anglais) qui émettent à 365 nm (Mori *et al.*, 2007), les lampes à cathode creuse qui émettent à 220 nm ou moins (Soloshenko *et al.*, 2006), les lampes « excimer » à décharge dans un mélange d'un gaz inerte (xénon, krypton) et d'un halogène (brome, chlore) qui émettent à une longueur d'onde de l'ordre de 280 nm (Xe Br) (Naunovic *et al.*, 2008) ou à 308 nm (Xe Cl) ou encore à 222 nm (Kr Cl) (Sosnin *et al.*, 2006).

Les études sur ces dispositifs portent uniquement sur les performances en termes d'efficacité d'inactivation de bactéries sans aborder les risques de formation de sous-produits susceptibles d'être toxiques. Une synthèse de la bibliographie disponible sur le sujet est présentée en annexe E.

Conclusion

En France comme dans d'autres pays européens et plus largement au niveau mondial, la validation des procédés de désinfection de l'eau destinée à la consommation humaine mettant en œuvre des réacteurs UV est un pré-requis à leur mise sur le marché.

L'intérêt grandissant du traitement de l'eau par les rayonnements UV, outre son activité bactéricide, repose essentiellement sur son potentiel d'inactivation des protozoaires des genres *Cryptosporidium* et *Giardia*.

Cependant, la désinfection par les rayonnements UV présente quelques limites. L'absence d'effet rémanent ne permet pas d'assurer le maintien de la qualité microbiologique de l'eau en cours de distribution. Des phénomènes de réparation des micro-organismes peuvent survenir et induire des reviviscences. L'efficacité virucide est très variable selon la nature des virus (à ADN ou à ARN). Pour maîtriser les points critiques de ce procédé de désinfection, une dose d'irradiation minimale doit être reçue par l'eau et, notamment dans les eaux susceptibles de contenir des virus, un traitement de désinfection chimique doit être couplé au traitement par rayonnements UV.

Il convient de rappeler que les réacteurs UV mis sur le marché ont obtenu une reconnaissance de leur innocuité et de leur efficacité et que ces propriétés sont garanties sous réserve que le réacteur :

- fonctionne dans les conditions d'usage définies (débit / transmittance de l'eau) suite à la réalisation des essais d'efficacité et assurant que l'eau traitée reçoit bien une dose d'irradiation donnée ;
- soit en tous points identique au modèle sur lequel ont été menés les essais d'efficacité (référence de la lampe, de la gaine de coupure, des matériaux, etc.) ;
- soit correctement mis en œuvre, entretenu et contrôlé par la personne responsable de la production d'eau.

Les lignes directrices exposées ci-après visent à améliorer l'évaluation de l'innocuité et de l'efficacité du traitement de l'eau destinée à la consommation humaine par les réacteurs UV. Elles donnent aux responsables de la mise sur le marché de ces procédés un référentiel technique détaillé pour constituer leur dossier de demande en France en précisant et expliquant les points sur lesquels porte l'évaluation. L'approche intègre le contexte international et prend en compte les normes appliquées dans d'autres pays européens afin de faciliter le processus de reconnaissance mutuelle. Leur domaine d'application ne couvre que les réacteurs mettant en œuvre des lampes à vapeur de mercure basse et moyenne pression positionnées dans le flux d'eau à traiter. Ainsi, ces lignes directrices devront être adaptées le cas échéant pour l'évaluation des dispositifs UV utilisant d'autres types de lampes, comme des diodes ou des systèmes flash qui émettent un signal très bref mais avec une très forte énergie photonique, ou encore pour les systèmes dans lesquels les lampes sont placées hors du flux d'eau et qui transfèrent le rayonnement UV. Elles devront également être modifiées si l'évolution des connaissances scientifiques le nécessite.

L'Anses recommande qu'une liste des réacteurs disposant d'une autorisation soit tenue à jour et rendue publique.

Par ailleurs, l'Anses souligne l'intérêt d'étudier plus précisément ce type de procédé pour des usages de désinfection d'autres types d'eaux, notamment les eaux utilisées dans les industries agro-alimentaires, et l'eau de mer utilisées dans les criées ou en conchyliculture, afin de s'assurer que la complexité technique et la maîtrise du procédé sont correctement prises en compte.

Enfin, les éléments présentés dans le rapport confirment la nécessité d'approfondir les connaissances relatives à la répartition de la dose de rayonnements UV dans le flux d'eau traitée, aux conditions de formation de sous-produits et aux phénomènes de réparation des micro-organismes. Ce dernier point relève encore du champ de la recherche fondamentale et finalisée.

L'Anses reprend à son compte le rapport, ses conclusions et les lignes directrices issues de l'expertise collective menée au sein du groupe de travail dédié et validées par le comité d'experts spécialisé « Eaux ».

Le directeur général

Marc MORTUREUX

Lignes directrices pour l'évaluation des réacteurs équipés de lampes à rayonnements ultraviolets et de l'efficacité de ces procédés pour la désinfection des eaux destinées à la consommation humaine

1. Innocuité et efficacité

1.1. Innocuité des matériaux

Le pétitionnaire déclare les différentes parties de son réacteur, les matériaux qui les composent et précise les pourcentages de contact avec l'eau.

Tous les matériaux doivent disposer d'une preuve de conformité sanitaire en cours de validité (attestation de conformité sanitaire (ACS) ou conformité aux listes positives (CLP)).

Pour les matériaux organiques, si la surface de contact est supérieure à 5 % de la surface totale mouillée, le pétitionnaire apporte la preuve qu'il ne réagit pas aux rayonnements UV car l'ACS ne comporte pas de vérification sur ce point.

Le cycle de vie de chacun des composants est précisé, en particulier le mode de récupération et de traitement des lampes à vapeur de mercure.

1.2. Innocuité des produits d'entretien

Le pétitionnaire déclare les produits d'entretien ainsi que les protocoles de maintenance qu'il préconise pour les réacteurs et pour les gaines de coupure. Ces protocoles doivent préciser :

- Si le produit d'entretien est utilisé en dehors des phases de production (en arrêt) : les méthodes de rinçage et le contrôle de l'efficacité du rinçage doivent alors être décrits.
- Si le produit d'entretien est utilisé pendant la production (en continu) : le pétitionnaire doit alors apporter la preuve que le produit n'a aucun impact sur la qualité de l'eau.

Les produits doivent présenter une preuve de conformité sanitaire en cours de validité (CLP).

Il est recommandé que soit réalisé un recensement des produits utilisés.

1.3. Risque de formation de sous-produits indésirables liés à l'émission de la lampe

Le pétitionnaire fournit le spectre de la lampe seule et le cas échéant le spectre de la lampe équipée de son dispositif de coupure.

Il fournit également le pourcentage d'irradiance émis dans le spectre des rayonnements UV-C.

Sur ce point deux exigences figurent dans les normes suivantes :

- Les normes OENORM M 5973-1 et -2 en leur article 6.3 qui demande :
 - que l'irradiance aux longueurs d'ondes inférieures à 240 nm soit inférieure à 3% de l'irradiance mesurée entre 240 et 400 nm,
 - ET pour les lampes à moyenne pression que l'irradiance émise pour les longueurs d'onde autres que 253,7 nm ne soit pas égale à plus de 85% de l'irradiance émise sur l'ensemble du domaine des rayonnements UV-C.
- OU la norme DVGW avec son article 9.3 qui demande que l'irradiance aux longueurs d'ondes inférieures à 240 nm corresponde à moins de 5% de l'irradiance totale émise entre les longueurs d'onde de 240 à 290 nm.

Le groupe de travail propose de suivre les exigences des normes en matière d'énergie :

- Pour les lampes à basse pression : que l'irradiance aux longueurs d'ondes inférieures à 240 nm corresponde à moins de 5% de l'irradiance totale émise entre les longueurs d'onde de 240 à 290 nm ;
- Pour les lampes à moyenne pression : que l'irradiance aux longueurs d'ondes inférieures à 240 nm corresponde à moins de 3% de l'irradiance totale émise entre 240 et 400 nm.

1.4. Risque de formation de sous-produits indésirables liés à la dose

Le pétitionnaire fournit la répartition de la dose au sein du réacteur et la dose reçue par le flux d'eau, les deux obtenues à différents débits de fonctionnement du réacteur.

Les critères d'acceptabilité suivants sont proposés :

- Pour les lampes à basse pression : la DRE doit être de 600 J/m² avec au moins 90% du flux d'eau recevant une dose comprise entre 400 J/m² et 1000 J/m² et moins de 5% du flux recevant une dose inférieure à 400 J/m² (pour limiter les phénomènes de réparation à l'obscurité) et moins de 5 % du flux recevant une dose supérieure à 1000 J/m² du fait qu'il n'y a qu'une seule longueur d'onde d'émission et par conséquent les risques de formations de sous-produits à haute énergie sont limités.
- Pour les lampes à moyenne pression : la DRE doit être de 400J/m² avec au moins 90 % du flux d'eau recevant une dose comprise entre 400 J/m² et 800 J/m² et moins de 5 % du flux recevant une dose inférieure à 400 J/m² (pour limiter les phénomènes de réparation à l'obscurité) et moins de 5% du flux recevant une dose supérieure à 800 J/m² du fait qu'il y a plusieurs longueurs d'ondes émises en conséquence la limite haute est réduite pour limiter les risques de formations de sous-produits à haute énergie.

1.5. Concernant le risque de formation de sous-produits indésirables liés à la présence de précurseurs :

Le pétitionnaire présente des résultats d'essais sur une eau dopée à 50 mg/L de nitrates et apporte la preuve que dans différentes conditions de fonctionnement la concentration en nitrites après traitement est inférieure à 0,1 mg/L dans l'eau produite. Cet essai n'est pas nécessaire pour les réacteurs équipés de lampes basse pression/basse énergie.

1.6. Qualité de l'eau à traiter :

- Pour éviter la formation de sous-produits indésirables :
 - l'eau à traiter ne doit pas contenir d'oxydants (ozone, chlore, dioxyde de chlore, chloramine et permanganate de potassium) ;
 - lorsque l'eau présente des traces d'iode à une concentration supérieure à 10 µg/L, le risque de formation de composés iodés sapides ne peut pas être écarté.
- Pour éviter la formation de dépôts sur les gaines qui diminuent la transmission des rayonnements UV et sur les radiomètres :
 - l'eau doit être à l'équilibre calco-carbonique à 40°C (donc légèrement agressive à température ambiante) pour éviter les précipitations potentielles de carbonate de calcium ;
 - la concentration en fer de l'eau à traiter ne doit pas dépasser 50 µg/L ;
 - la concentration en manganèse de l'eau à traiter ne doit pas dépasser 20 µg/L.

Dans tous les cas, les modalités de nettoyage doivent être adaptées à la qualité de l'eau à traiter.

- Pour assurer une bonne transmission des rayonnements UV dans l'eau à traiter :
 - la turbidité de l'eau à l'entrée du réacteur ne doit pas dépasser 0,3 NFU ;
 - son absorption UV ne doit pas dépasser 10 m⁻¹ à la longueur d'onde de 253,7 nm.

1.7. Efficacité de désinfection

Elle est contrôlée de manière indirecte par biodosimétrie. Le pétitionnaire fournit les résultats des essais biodosimétriques qui sont constitués de deux étapes :

- un essai statique qui permet d'obtenir une corrélation entre la dose de rayonnements UV et le taux d'inactivation d'un micro-organisme test, ce dernier pouvant être soit le bactériophage MS2 (conformément aux recommandations de l'US-EPA), soit les spores de *Bacillus subtilis* (conformément aux normes européennes).
- un essai semi-dynamique en faisant varier les paramètres de fonctionnement (débit, transmittance de l'eau et puissance des lampes) en utilisant le même micro-organisme test que pour l'essai statique afin d'obtenir des abaques permettant de définir le domaine d'utilisation du réacteur assurant une DRE de 400 J/m² ou 600 J/m².

Ces essais peuvent être réalisés suivant les normes existantes : OENORM M 5873-1 ou -2, DVGW W294 ou US-EPA UVGM. Ils sont effectués par des centres d'essais certifiés selon ces normes ou équivalent BPL (chapitre 4.5.2 de la norme DVGW 294-2). Si les essais sont réalisés en dehors de l'Union européenne, la justification de la compétence et de l'indépendance du laboratoire est apportée.

Dans tous les cas, le pétitionnaire transmet l'intégralité du protocole et des résultats des essais dans son dossier de demande.

Chaque modèle de réacteur est identifié par son nom, sa configuration, le nombre de lampes, la référence de la lampe et la référence de la gaine quand il y en a une. Les essais sont menés pour chacun des modèles d'une même gamme et avec le type de lampe et de gaine commercialisés.

1.8. Contrôle des conditions de fonctionnement

Le pétitionnaire fournit la référence, les caractéristiques et l'origine du radiomètre de référence qu'il met en œuvre. Il précise également: l'incertitude de mesure, les modalités de vérification de l'étalonnage, les modalités d'étalonnage (fréquence, compétence de l'intervenant, etc.).

Le pétitionnaire fournit l'origine et la référence des radiomètres de travail qu'il met en œuvre. Il précise également la tolérance admise avec le radiomètre de référence, la fréquence de vérification avec le radiomètre de référence, l'incertitude de mesure.

Le pétitionnaire précise et justifie le nombre de radiomètres mis en œuvre par rapport au nombre de lampes du réacteur. Il indique et justifie l'emplacement des radiomètres par rapport à la configuration du réacteur.

Dans tous les cas les radiomètres de travail doivent mesurer la dose dans le flux d'eau.

1.9. Durée de l'agrément

L'agrément ne devrait pas être délivré pour une durée supérieure à 5 ans. Cette durée est identique à celle appliquée pour les certificats Allemand et Autrichiens.

2. Préconisations de mise en œuvre et de suivi

2.1. Utilisation à domicile

L'utilisation de réacteurs équipés de lampes à rayonnements UV (Réacteurs UV) à domicile n'est pas recommandée en raison notamment du délai nécessaire lié au chauffage des lampes et des risques de formation de produits secondaires lorsqu'ils traitent de l'eau chlorée. En effet, dans le cadre des

connaissances actuelles, l'effet biocide n'apparaît qu'après un temps de chauffage de la lampe de 5 à 10 minutes. En conséquence, les utilisations discontinues ou séquentielles de ces traitements sont fortement déconseillées. Par ailleurs, l'utilisation continue de ces traitements sur une eau non circulante ou en boucle fermée entraîne un réchauffement de l'eau et des risques de croissance microbologique dans les réseaux. L'expérience acquise montre que l'utilisation des réacteurs UV en réseau domestique est fortement déconseillée pour les eaux :

- de distribution publique sur des parties privées du réseau,
- de puits privé à usage unifamilial,
- de puits privé avec mise à disposition de l'eau au public,
- des fontaines réfrigérantes,
- chaudes sanitaires.

Seuls les traitements pour les types d'eau suivants peuvent être recommandés dans le cadre de process industriels en usine pour les eaux:

- utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine,
- utilisées dans l'industrie agroalimentaire et entrant dans la fabrication d'une denrée ou en contact avec celle-ci. Ces eaux sont issues de l'eau distribuée par le réseau public ou produites à partir d'une ressource privée conformément aux dispositions du code de la santé publique (CSP).

2.2. Place du traitement par rayonnements UV dans la chaîne de potabilisation

Compte tenu de la qualité d'eau nécessaire pour assurer l'innocuité et l'efficacité optimale du traitement par rayonnements UV, il est recommandé de placer le réacteur UV en fin de filière.

En raison du taux d'inactivation de certains virus, il est recommandé d'ajouter une étape de désinfection par un produit biocide autorisé en aval du traitement par rayonnements UV. En fonction de la charge virale de l'eau le responsable de la production d'eau devra s'assurer que la filière dispose de la capacité de désinfection nécessaire.

Le traitement de désinfection par les rayonnements UV n'a aucun effet rémanent et si un tel effet est recherché, notamment pour le transport de l'eau un produit biocide rémanent autorisé doit être mis en œuvre.

2.3. Précautions de suivi

Le dispositif de rayonnements UV est équipé, en complément des radiomètres UV, de capteurs permettant de s'assurer de la qualité de l'eau avant et après le traitement par rayonnements UV (température, turbidité, etc.) et de capteurs permettant de suivre les paramètres de fonctionnement du réacteur (débit, énergie électrique consommée, etc.).

Bibliographie

- Banyasz A., Karpati S., Lazzarotto E. & Markovitsi D., 2009.** UV-induced structural changes of model DNA helices probed by optical spectroscopy. *The journal of physical chemistry* 113(27), 11747-11750.
- Baxter C.S., Hofmann R., Templeton M.R., Brown M. & Andrews R.C., 2007.** Inactivation of adenovirus types 2, 5, and 41 in drinking water by UV light, free chlorine, and monochloramine. *Journal of Environmental Engineering* 133 (1), 95-103.
- Bohrerova Z. & Linden K.G., 2006.** Assessment of DNA damage and repair in *Mycobacterium terrae* after exposure to UV irradiation. *Journal of Applied Microbiology* 101 (5), 995-1001.
- Cadet J., Douki T., Ravanat J.L. & Di Mascio P., 2009.** Sensitized formation of oxidatively generated damage to cellular DNA by UVA radiation. *Photochemical and photobiological sciences* 8, 903-911.
- Canonica S., Meunier L. & von Gunten U., 2008.** Phototransformation of selected pharmaceuticals during UV treatment of drinking water. *Water Research* 42 (1-2), 121-128.
- Cheung M.S., Dalzadeh I., Stuchebrukhov A.A. & Heelis P.F., 1999.** Pathways of electron transfer in *Escherichia coli* DNA photolyases: Trp306 to FADH. *Biophysical journal* 78, 1241-1249.
- Clancy J.L., Hargy T.M., Marshall M.M. & Dyksen J.E., 1998.** UV light inactivation of *Cryptosporidium* oocysts. *Journal of American water works association* 90 (9), 92-102.
- Craik S.A., Finch G.R., Bolton J.R. & Belosevic M., 2000.** Inactivation of *Giardia muris* cysts using medium-pressure ultraviolet radiation in filtered drinking water. *Water Research* 34, 4325-4332.
- Craik S.A., Weldon D., Finch G.R., Bolton J.R. & Belosevic M., 2001.** Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts using medium- and low-pressure ultraviolet radiation. *Water Research* 35, 1387-1398.
- DGS, 1987.** Circulaire DGS/PGE/1-D n°52 du 19 janvier 1987 sur la désinfection des eaux destinées à la consommation humaine par les rayons ultra-violet, 5.
- DGS, 2007.** Arrêté du 17 août 2007 relatif à la constitution du dossier de demande de mise sur le marché d'un produit ou d'un procédé de traitement d'eau destinée à la consommation humaine, mentionné à l'article R. 1321-50-IV du code de la santé publique (modifié par arrêté du 17 juin 2009).
- Dumètre A., Le Bras C., Baffet M., Meneceur P., Dubey J.P., Derouin F., Duguet J.-P., Joyeux M. & Moulin L., 2008.** Effects of ozone and ultraviolet radiation treatments on the infectivity of *Toxoplasma gondii* oocysts. *Veterinary Parasitology* 153 (3-4), 209-213.
- DVGW, 2006a.** Technical standard W294-1 - Appareil de désinfection UV dans l'approvisionnement en eau - Partie 1 : exigences relatives à la qualité, au fonctionnement et à l'exploitation.
- DVGW, 2006b.** Technical standard W294-2 - appareil de désinfection UV dans l'approvisionnement en eau - Partie 2 : examen de la qualité, du fonctionnement et de l'efficacité de désinfection.
- DVGW, 2006c.** Technical standard W294-3 - appareil de désinfection UV dans l'approvisionnement en eau - Partie 3 : Fenêtres de mesure et capteurs pour la surveillance radiométrique d'appareils de désinfection UV - exigences, examen et étalonnage.
- Eischeid A.C., Meyer J.N. & Linden K.G., 2009.** UV disinfection of adenoviruses: Molecular indications of DNA damage efficiency. *Applied and Environmental Microbiology* 75 (1), 23-28.
- Gerrity D., Ryu H., Crittenden J. & Abbaszadegan M., 2008.** UV inactivation of adenovirus type 4 measured by integrated cell culture qPCR. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 43 (14), 1628-1638.
- Golstein S. & Rabani J., 2007.** Mechanism of nitrite formation by nitrate photolysis in aqueous solution : the role of peroxyxynite, nitrogen dioxide and hydroxyl radical. *Journal of the American Chemical Society* 129, 10597-10601.
- Grabner G., Köhler G., Zechner J. & Getoff N., 1977.** Pathways for formation of hydrated electrons from excited phenol and related compounds. *Photochemistry Photobiology* 25 (5), 449-458.
- Hayes S.L., White K.M. & Rodgers M.R., 2006.** Assessment of the effectiveness of low-pressure UV light for inactivation of *Helicobacter pylori*. *Applied and Environmental Microbiology* 72 (5), 3763-3765.
- Hayes S.L., Sivaganesan M., White K.M. & Pfaller S.L., 2008.** Assessing the effectiveness of low-pressure ultraviolet light for inactivating *Mycobacterium avium* complex (MAC) micro-organisms. *Letters in Applied Microbiology* 47 (5), 386-392.
- Henry V., Helbronner A. & Recklinghausen M., 1910.** Nouvelles recherches sur la stérilisation de grandes quantités d'eau par les rayons ultraviolets. *compte rendu académie des sciences* 151, 677-680.
- Hijnen W.A.M., Beerendonk E.F. & Medema G.J., 2006.** Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review. *Water Research* 40 (1), 3-22.

- Jin F., Leitch J. & von Sonntag C., 1995. The photolysis ($\lambda = 254$ nm) of tyrosine in aqueous solutions in the absence and presence of oxygen. The reaction of tyrosine with singlet oxygen. *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry* 92 (3), 147-153.
- Johnson A.M., Linden K.G., Ciociola K.M., De Leon R., Widmer G. & Rochelle P.A., 2005. UV Inactivation of *Cryptosporidium hominis* as Measured in Cell Culture. *Applied and Environmental Microbiology* 71(5), 2800-2802.
- Jungfer C., Schwartz T. & Obst U., 2007. UV-induced dark repair mechanisms in bacteria associated with drinking water. *Water Research* 41 (1), 188-196.
- Kim I. & Tanaka H., 2009. Photodegradation kinetics of PPCPs in water with UV treatment. *Environment International* 35, 793-802.
- Kim I., Yamashita N. & Tanaka H., 2009. Photodegradation of pharmaceuticals and personal care products during UV and UV/H₂O₂ treatments. *Chemosphere* 77, 518-525.
- Kowalski W., 2009. Chapter 2: Ultraviolet Germicidal Irradiation theory. In *Ultraviolet disinfection handbook*, dition Springer-Verlag Berlin Heidelberg. p. 17-50.
- Lee C. & Yoon J., 2007. UV-A induced photochemical formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) in the presence of nitrite and dimethylamine. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 189 (1), 128-134.
- Lee C., 2009.
- Linden K.G., Shin G.-A., Faubert G., Cairns W. & Sobsey M.D., 2002. UV disinfection of *Giardia lamblia* cysts in water. *Environmental Science and Technology* 36 (11), 2519-2522.
- Linden K.G., Thurston J., Schaefer R. & Malley Jr. J.P., 2007. Enhanced UV inactivation of adenoviruses under polychromatic UV lamps. *Applied and Environmental Microbiology* 73 (23), 7571-7574.
- Liu C., Qiang Z., Tian F. & Zhang T., 2009. Photodegradation of etridiazole by UV radiation during drinking water treatment. *Chemosphere* 76 (5), 609-615.
- Liu D., Wu C., Linden K. & Ducoste J., 2007. Numerical simulation of UV disinfection reactors: Evaluation of alternative turbulence models. *Applied Mathematical Modelling* 31 (9), 1753-1769.
- Mack J. & Bolton J.R., 1999. Photochemistry of nitrite and nitrate in aqueous solution: A review. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 128 (1-3), 1-13.
- Mofidi A.A., Meyer E.A., Wallis P.M., Chou C.I., Meyer B.P., Ramalingam S. & Coffey B.M., 2002. The effect of UV light on the inactivation of *Giardia lamblia* and *Giardia muris* cysts as determined by animal infectivity assay (P-2951-01). *Water Research* 36 (8), 2098-2108.
- Mori M., Hamamoto A., Takahashi A., Nakano M., Wakikawa N., Tachibana S., Ikehara T., Nakaya Y., Akutagawa M. & Kinouchi Y., 2007. Development of a new water sterilization device with a 365 nm UV-LED. *Medical and Biological Engineering and Computing* 45 (12), 1237-1241.
- Morita S., Namikoshi A., Hirata T., Oguma K., Katayama H., Ohgaki S., Motoyama N. & Fujiwara M., 2002. Efficacy of UV irradiation in inactivating *Cryptosporidium parvum* oocysts. *Applied and Environmental Microbiology* 68 (11), 5387-5393.
- Munoz A., Cralk S. & Kresta S., 2007. Computational fluid dynamics for predicting performance of ultraviolet disinfection - Sensitivity to particle tracking inputs. *Journal of Environmental Engineering and Science* 6 (3), 285-301.
- Naunovic Z., Lim S. & Blatchley III E.R., 2008. Investigation of microbial inactivation efficiency of a UV disinfection system employing an excimer lamp. *Water Research* 42 (19), 4838-4846.
- OENORM, 2001. Standard OENORM M5873-1 - Plants for the disinfection of water using ultraviolet radiation - requirements and testing - part 1: Low pressure mercury lamp plants.
- OENORM, 2003. Standard OENORM M 5873-2 - Plants for the disinfection of water using ultraviolet radiation - requirements and testing - part 2: medium pressure mercury lamp plants. 40 p.
- Oguma K., Katayama H. & Ohgaki S., 2004. Photoreactivation of *Legionella pneumophila* after inactivation by low-pressure ultraviolet lamp. *Water Research* 38, 2757-2763.
- OMS, 2009. *Risk assessment of Cryptosporidium in drinking water* p.
- Oppezzo O.J. & Pizarro R.A., 2001. Sublethal effects of ultraviolet A radiation on *Enterobacter cloacae*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: biology* 62(3), 158-165.
- Pan H. & Orava M., 2007. Performance evaluation of the UV disinfection reactors by CFD and fluence simulations using a concept of disinfection efficiency. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 56 (3), 181-189.
- Papavinasundaram K.G., Anderson C., Brooks P.C., Thomas N.A., Movahedzadeh F., Jenner P.J., Colston M.J. & Davis E.O., 2001. Slow induction of RecA by DNA damage in *Mycobacterium tuberculosis*. *Microbiology* 147 (12), 3271-3279.
- Qian S.S., Donnelly M., Schmelling D.C., Messner M., Linden K.G. & Cotton C., 2004. Ultraviolet light inactivation of protozoa in drinking water: a Bayesian meta-analysis. *Water Research* 38 (2), 317-326.

- Rose L.J. & O'Connell H., 2009.** UV Light inactivation of bacterial biothreat agents. *Applied and Environmental Microbiology* 75(9) (2987-2990).
- Salcedo I., Andrade J.A., Quiroga J.M. & Nebot E., 2007.** Photoreactivation and dark repair in UV-treated microorganisms: Effect of temperature. *Applied and Environmental Microbiology* 73 (5), 1594-1600.
- Sanches S., Barreto Crespo M.T. & Pereira V.J., 2010.** Drinking water treatment of priority pesticides using low pressure UV photolysis and advanced oxidation processes. *Water Research* 44 (6), 1809-1818.
- Shin G.-A., Lee J.-K., Freeman R. & Cangelosi G.A., 2008.** Inactivation of Mycobacterium avium complex by UV irradiation. *Applied and Environmental Microbiology* 74 (22), 7067-7069.
- Shin G.-A., Lee J.-K. & Linden K.G., 2009.** Enhanced effectiveness of medium-pressure ultraviolet lamps on human adenovirus 2 and its possible mechanism. *Water Science and Technology* 60 (4), 851-857.
- Soloshenko I.A., Bazhenov V.Y., Khomich V.A., Tsiolko V.V. & Potapchenko N.G., 2006.** Comparative research of efficiency of water decontamination by UV radiation of cold hollow cathode discharge plasma versus that of low- and medium-pressure mercury lamps. *IEEE Transactions on Plasma Science* 34 (4 II), 1365-1369.
- Sosnin E.A., Oppenländer T. & Tarasenko V.F., 2006.** Applications of capacitive and barrier discharge excilamps in photochemistry. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 7 (4), 145-163.
- Süss J., Volz S., Obst U. & Schwartz T., 2009.** Application of a molecular biology concept for the detection of DNA damage and repair during UV disinfection. *Water Research* 43 (15), 3705-3716.
- Templeton M.R., Antonakaki M. & Rogers M., 2009.** UV dose-response of Acinetobacter baumannii in water. *Environmental Engineering Science* 26 (3), 697-701.
- US EPA, 2006.** UVGM-Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule.
- Vione D., Minero C., Housari F. & Chiron S., 2007.** Photoinduced transformation processes of 2,4-dichlorophenol and 2,6-dichlorophenol on nitrate irradiation. *Chemosphere* 69 (10), 1548-1554.
- Wainwright K.E., Lagunas-Solar M., Miller M.A., Barr B.C., Gardner I.A., Pina C., Melli A.C., Packham A.E., Zeng N., Truong T. & Conrad P.A., 2007.** Physical inactivation of Toxoplasma gondii oocysts in water. *Applied and Environmental Microbiology* 73 (17), 5663-5666.
- Wilson B.R., Roessler P.F. & Van Dellen E., 1992.** Coliphage MS-2 as a UV Water Disinfection Efficacy Test Surrogate for Bacterial and Viral Pathogens. Water Quality technology Conference : november 15-19. Toronto, Ontario.
- Zheng M., Andrew S.A. & Bolton J.R., 1999.** Impacts of medium-pressure UV and UV/H₂O₂ on THM and HAA formation in a ure-UV chlorinated drinking water. Proceedings of WQTC 31 oct.- 03 nov. Tampa, Fl.
- Zimmer-Thomas J.L., Slawson R.M. & Huck P.M., 2007.** A comparison of DNA repair and survival of Escherichia coli O157:H7 following exposure to both low- and medium- pressure UV irradiation. *Journal of Water and Health* 5 (3), 407-415.

Annexe A : Modélisations hydrauliques et photoniques

1. Modèle numérique de dynamique des fluides

L'inactivation des micro-organismes dans des réacteurs UV opérant en continu est particulièrement dépendante de l'hydrodynamisme et des conditions de mélange au sein de la partie irradiée du réacteur. Des modèles basés sur des réacteurs ouverts parfaitement agités ou des réacteurs ouverts à écoulement piston avec dispersion axiale ont tout d'abord été développés (Severin *et al.*, 1984, Scheible, 1987). Des traceurs ont également été utilisés pour déterminer les temps de séjours au sein de ces réacteurs (Qualls et Johnson, 1985).

La tendance actuelle est désormais d'utiliser des Modèles Numériques de Dynamique des Fluides (CFD – Computational Fluid Dynamic). Dans ces analyses CFD, la première étape consiste à déterminer le champ de vecteur de vitesse en résolvant les équations de mouvement de Navier-Stokes (Munoz *et al.*, 2007) en conjonction avec un modèle de turbulence adéquat comme le modèle $k - \epsilon$, ou le modèle de la tension de Reynolds ou encore un mélange des deux modèles : équations Navier-Stokes moyennées par Reynolds -modèle RANS- (Sozzi et Taghipour, 2006) :

$$\nabla (\rho, \vec{v}) = - \nabla P + \nabla (\vec{\tau}) + \rho g$$

Avec :

- ρ , la densité ;
- \vec{v} , la vitesse ;
- P , la pression ;
- $\vec{\tau}$, la tension de Reynolds ;
- et g , la gravité.

De façon générale, les fabricants utilisent un logiciel commercial pour résoudre cette équation (logiciel FLUENT par exemple).

Une fois que le champ de vitesse a été déterminé, l'ensemble du réacteur est discrétisé : représentation du réacteur sous la forme de mailles plus ou moins structurées, et en un nombre plus ou moins grand, suivant la taille et la géométrie du réacteur (logiciel de maillage : GAMBIT par exemple). Les vitesses volumétriques de réaction sont calculées en fonction du taux de fluence local et en fonction de la concentration en micro-organismes dans chaque maille. Chaque maille est traitée comme un réacteur homogène parfaitement agité.

A partir de cette étape, deux approches distinctes peuvent être utilisées afin de déterminer les taux de fluence : l'approche eulérienne (Elyasi et Taghipour, 2006) et l'approche lagrangienne (Sozzi et Taghipour, 2006).

Quelle que soit la méthode appliquée, le modélisateur doit considérer toutes les variables à entrer dans le modèle, et principalement, le nombre de particules utilisé pour simuler les micro-organismes. Ces données revêtent un caractère prépondérant dans les modèles numériques tridimensionnels de dynamique des fluides (3D-CFD) utilisés pour simuler des réacteurs UV grand volume, multi-lampes où un nombre important d'éléments de volumes finis est requis pour décrire le réacteur de façon précise.

1.1 Approche Lagrangienne

Dans cette approche également appelée approche du traçage de particules, les micro-organismes sont considérés comme des particules discrètes, et les parcours probables de ces particules au sein du réacteur sont calculés soit en résolvant une équation de quantité mouvement des particules ($p = mv$, avec p la quantité de mouvement, m la masse de particules, v la vitesse), soit en utilisant un algorithme « random-walk » (marche aléatoire, littéralement). Les doses de rayonnements UV accumulées reçues par chaque particule-micro-organisme sont ensuite déterminées par intégration numérique du champ de taux de fluence et des informations sur la trajectoire des particules. En répétant ce calcul pour de nombreuses particules, une distribution de dose de rayonnements UV est produite. La distribution de dose numérisée peut être combinée avec des modèles cinétiques d'inactivation par les rayonnements UV de micro-organismes pour générer une Dose de Réduction Équivalente (DRE) pour un micro-organisme donné.

Les trajectoires des particules sont simulées sur la base d'un champ de vitesse continu et homogène au sein du réacteur. Un nombre statistiquement représentatif de particules (représentant les micro-organismes) est introduit à l'entrée du réacteur (N_0) et la dose de rayonnements UV absorbée est intégrée le long de la trajectoire suivie par chacune des particules. La dose absorbée en chaque point est calculée en multipliant le taux de fluence (E) moyen en un point donné du réacteur durant le temps Δt auquel la particule est soumise à ce taux de fluence localisé. Pour chaque intervalle de dose i , le nombre de micro-organismes vivants, N_i est calculé suivant :

$$N_i = \alpha_i \times N_0 \exp(-kD_i)$$

Avec :

- α_i = la fraction de particules qui reçoivent la dose D_i ;
- k , la constante de vitesse d'inactivation du micro-organisme de référence ;
- D_i , la dose moyenne pour un intervalle i donné.

La somme de toutes les particules vivantes sur l'ensemble du domaine des doses donnent le nombre total estimé de particules vivantes (micro-organismes) qui quittent le réacteur, N :

$$N = \sum N_i$$

1.2 Approche eulérienne

Dans cette approche, les micro-organismes sont considérés plutôt comme des traceurs réactifs dans un réacteur chimique, et l'inactivation est déterminée par l'utilisation d'équations rendant compte des phénomènes de convection-diffusion au sein du réacteur et incluant un terme de réaction.

L'équation de conservation des espèces (micro-organismes) est résolue simultanément aux équations de transport. La fraction locale des masses de chacune des espèces est prédite par la résolution des équations de convection-diffusion afin de calculer la concentration de micro-organismes vivants dans tout le domaine étudié :

$$\nabla (\vec{v} C) = - \nabla \vec{J} + R$$

où \vec{J} est le flux de diffusion (incluant la dispersion par turbulence) des espèces et R la vitesse de la réaction. Pour des micro-organismes qui ont une vitesse d'inactivation linéaire, caractérisée par une constante de vitesse k , la vitesse d'inactivation R est égale à :

$$R = - k E C$$

où E est le taux de fluence local et C est la concentration en micro-organismes.

2. Modèle de distribution du taux de fluence

2.1 Quelques notions d'optique

Dans un réacteur UV, les radiations émises par la lampe doivent traverser une couche d'air entourant la lampe, puis traverser la gaine de quartz (dopée ou non) avant d'atteindre l'eau à désinfecter. Les radiations émises par la lampe sont donc atténuées par des phénomènes de réflexion et d'absorption au cours de la traversée de ces différents milieux (air, quartz, eau). La figure A1 décrit ces différents facteurs pour un trajet optique type.

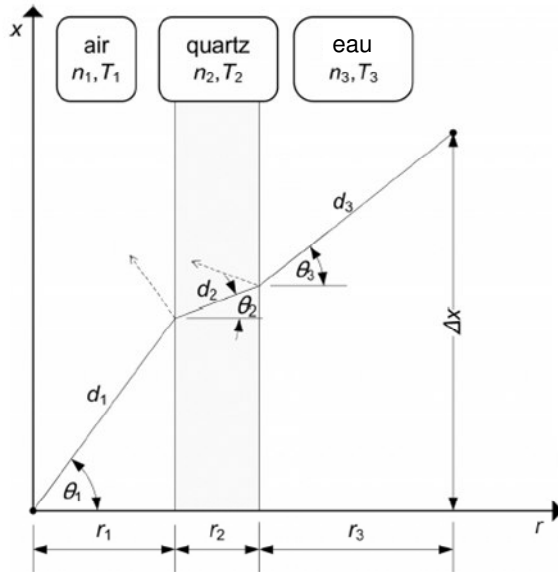


Figure A1 : Trajet optique dans un réacteur UV : la lumière part de la source située sur l'axe des x jusqu'à la particule située sur les coordonnées $(r_3, \Delta x)$.

$n_1 (=1)$, $n_2 (= 1,506$ pour un quartz non dopé), n_3 sont les indices de réfraction respectifs de l'air, du quartz, et de l'eau.

T_1 , T_2 et T_3 sont les transmittances respectives de l'air, du quartz et de l'eau à traiter.

Une autre composante de la réfraction est l'effet focus. Si on ne considère aucun phénomène de réfraction, la puissance des radiations émises d'un point source avec une différence angulaire finie égale à $2 \Delta\theta_1$ (Figure A2) et traversant une distance égale à $d_1 + d_2 + d_3$, cette radiation couvrirait un cercle de diamètre g_{w0} . Si l'on exploite le fait que les lampes UV ont une symétrie cylindrique, cette section transversale devient un cône tronqué de surface A_{w0} , avec un angle d'ouverture de $2 \theta_1$, l'axe de la lampe étant l'axe du cône et la génératrice de cet angle étant g_{w0} .

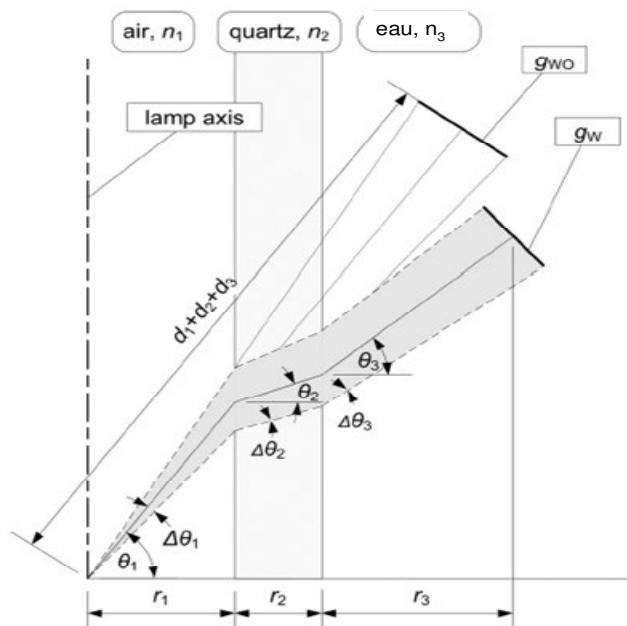


Figure A2 : Effet focus : le trajet optique avec et sans phénomène de réfraction et les génératrices résultantes g_w et g_{w0} .

En intégrant les phénomènes de réfraction aux interfaces air/quartz/eau, tout en maintenant le trajet optique $d_1 + d_2 + d_3$ constant, le cône tronqué présente alors une surface A_W , une ouverture d'angle $2 \Delta\theta_3$ et une génératrice g_W .

Ce facteur focus a été introduit par Liu en 2004. Il permet de prendre en compte la concentration de la lumière en un point, et donc de prendre en compte le taux de fluence en un point donné. Ce facteur focus correspond au ratio des deux surfaces des cônes tronqués A_{W0} et A_W . Il est égal à :

$$\text{Focus} = \frac{(d_1 + d_2 + d_3)^2}{(r_1 + r_2 + r_3) \cos\theta_3 n_1} \times \left(\frac{r_1}{n_1 \cos^3\theta_1} + \frac{r_2}{n_2 \cos^3\theta_2} + \frac{r_3}{n_3 \cos^3\theta_3} \right)$$

Pour calculer ensuite le taux de fluence, il est nécessaire de déterminer les angles de réfraction θ . Pour cela on utilise la loi de Snell.

$$r_1 \tan\theta_1 + n_1 \sin\theta_1 \frac{r_2}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1}} + n_1 \sin\theta_1 \frac{r_3}{\sqrt{n_3^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1}} = \Delta x$$

Cette équation ne peut être résolue que numériquement, différents types de solveurs existent (Reichl *et al.*, 2006).

Une fois que θ_1 a été déterminé, les différents types de modèles de détermination de taux de fluence peuvent entrer en jeu.

Il existe principalement quatre modèles qui permettent de simuler les taux d'irradiation. Ces modèles font régulièrement l'objet de perfectionnement.

2.2 Modèle MPSS

Dans le modèle MPSS -somme des points sources multiples- (modèle introduit par Jacob et Dranoff dans les années 1970 (Jacob et Dranoff, 1970), une lampe UV linéaire est considérée comme une série de n sources discrètes, espacées de façon régulière le long de l'axe longitudinal d'une lampe et qui émettent de la lumière de façon identique dans toutes les directions. La puissance de chaque source discrète est égale à Φ/n , avec Φ la puissance totale de la lampe, à la longueur d'onde considérée. Le taux de fluence dans un volume donné dV est la somme des taux de fluence pour chaque élément n de lampe, calculé pour chaque rayonnement passant à travers l'élément de volume dV considéré.

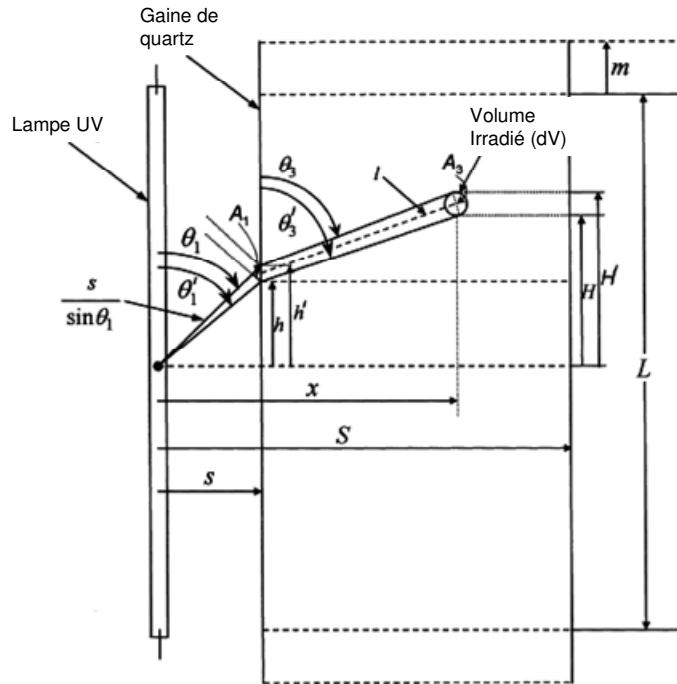


Figure A3 : Section transversale d'un réacteur UV. L est la longueur de la lampe UV considérée ; S est le rayon interne du réacteur et s est le rayon de la gaine de quartz ; $h = s \times \cot\theta$; $H = h + (x - s) \cot\theta_3$; A_1 et A_3 sont les surfaces transversales utilisées pour calculer le taux de fluence (Bolton, 2000)

Le taux de fluence diminue en fonction de l'éloignement de la source lumineuse du fait de la dispersion et de l'absorption du faisceau lumineux dans l'eau et dans la gaine de quartz entourant la source lumineuse.

Ce modèle peut également incorporer l'effet focus : on parle alors de modèle MPSS-F.

Selon de nombreux auteurs, ce modèle a tendance à surestimer la fluence à proximité des lampes (Liu *et al.*, 2004 ; Munoz *et al.*, 2007), et considèrent que ce modèle ne peut, en aucun cas, s'appliquer à des lampes polychromatiques.

2.3 Modèle MSSS

Dans le modèle MSSS –somme des sources segments multiples - (développé par Bolton au début des années 2000 (Bolton, 2000), les effets de la réflexion et de la réfraction aux interfaces air-quartz-eau sont pris en compte (effets indispensables à prendre en compte dans le cas des eaux destinées à la consommation humaine), et les lampes UV ne sont plus considérées comme des sources de formes sphériques, mais comme des séries de segments cylindriques identiques.

Dans ce modèle, l'énergie d'émission est plus grande dans l'axe perpendiculaire à la surface de chaque élément et décroît suivant le cosinus de l'angle ($\cos\theta_1$) fait entre la perpendiculaire et la direction de l'émission de la source lumineuse.

Ce modèle peut également incorporer l'effet focus : on parle alors de modèle MSSS-F.

De plus, dans ce modèle, Bolton a introduit un facteur pondérateur pour prendre en compte l'effet germicide des lampes polychromatiques.

2.4 Modèle LSI

Le modèle d'Intégration de la Source en Ligne est la version continue ou la version intégrée du modèle MPSS. Ce modèle est mathématiquement identique aux approches des points sources, avec n , le nombre de points sources, égal à l'infini ($n = \infty$). Ce modèle avait néanmoins l'inconvénient de ne pas prendre en compte les phénomènes d'absorption, de réflexion et de réfraction. Liu l'a corrigé en 2004 en y ajoutant un facteur d'atténuation : modèle LSI-F.

2.5 Modèle RADLSI

Récemment, Liu (Liu *et al.*, 2004 ; Liu, 2004), a amélioré les modèles existants en prenant en compte les écarts du modèle lorsqu'il s'agissait de déterminer les taux de fluence dans les zones proches de la lampe. Ce modèle RADLSI combine donc les avantages des modèles MSSS et LSI.

Bibliographie annexe A

- Bolton J.R., 2000.** Calculation of ultraviolet fluence rate distributions in an annular reactor: Significance of refraction and reflection. *Water Research* 34 (13), 3315-3324.
- Elyasi S. & Taghipour F., 2006.** Simulation of UV photoreactor for water disinfection in Eulerian framework. *Chemical Engineering Science* 61 (14), 4741-4749.
- Jacob S.M. & Dranoff J.S., 1970.** Light intensity profiles in a perfectly mixed photoreactor. *AIChE J.* 16 (3), 359-363.
- Liu D. 2004.** Numerical simulation of UV disinfection reactors : Impact of fluence rate distribution and turbulence modeling. In *Ph. thesis*, North Carolina State University.
- Liu D., Ducoste J., Jin S. & Linden K., 2004.** Evaluation of alternative fluence rate distribution models. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 53 (6), 391-408.
- Munoz A., Cralk S. & Kresta S., 2007.** Computational fluid dynamics for predicting performance of ultraviolet disinfection - Sensitivity to particle tracking inputs. *Journal of Environmental Engineering and Science* 6 (3), 285-301.
- Qualls R.G. & Johnson J.D., 1985.** Modeling and efficiency of ultraviolet disinfection systems. *Water Research* 19 (8), 1039-1046.
- Reichl C., Buchner C., Hoirschmann G., Sommer R. & Cabaj A., 2006.** Development of a simulation method to predict UV disinfection reactor performance and comparison to biosimetric measurements. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06), The 13th International Conference on Fluid Flow Technologies. Budapest, Hungary. September 6-9.
- Scheible O.K., 1987.** Development of a rationally based design protocol for the ultraviolet light disinfection process. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 59 (1), 25-31.
- Severin B.F., Suidan M.T., Rittmann B.E. & Engelbrecht R.S., 1984.** Inactivation kinetics in a flow-through UV reactor. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 56 (2), 164-169.
- Sozzi D.A. & Taghipour F., 2006.** UV reactor performance modeling by Eulerian and Lagrangian methods. *Environmental Science and Technology* 40 (5), 1609-1615.

Annexe B : Les radiomètres

Les réacteurs UV équipés de lampes à moyenne pression doivent avoir un radiomètre par lampe. Les réacteurs équipés de lampes à basse pression doivent avoir au moins un radiomètre par rangée de lampes (USEPA 2006).

Les caractéristiques techniques des radiomètres sont définies ci-dessous :

1. L'angle de mesure

Il existe des radiomètres avec un angle de mesure de 40° et d'autres avec un angle de mesure de 160°. Dans la norme autrichienne OENORM M5973, les deux angles de mesures sont retenus (40° et 160°) alors que dans la norme allemande DVGW 2940-1 à -3, seul l'angle de 40° l'est. Les angles de mesure fournissent des valeurs de mesure complètement différentes. Les appareils à rayonnements UV testés avec des radiomètres à 40° ne doivent fonctionner et être surveillés qu'avec des radiomètres à 40°. Les radiomètres avec un angle de mesure de 160° délivrent des valeurs plus élevées et le signal de mesure réagit différemment des radiomètres avec un angle de mesure plus petit.

2. L'angle de réponse

L'angle de réponse est fonction de l'angle incident à la fenêtre du radiomètre. L'angle de réponse est affecté par la taille de l'ouverture du radiomètre, la taille de la surface active du photo-détecteur, la distance entre l'ouverture et la surface active, l'impact des surfaces diffusant et réfléchissant la lumière UV.

Un radiomètre idéal a une réponse en forme de cosinus mais souvent, les radiomètres ont une réponse différente (figures B1 à B4). Les radiomètres d'appareil et les radiomètres de référence ne doivent afficher que l'éclairement énergétique pondéré dans le champ spectral biocide compris entre 240 et 290 nm. Il est souvent nécessaire d'utiliser des filtres qui garantissent ainsi un pourcentage détecté pour une longueur d'onde > 300 nm inférieur à 10 %, comme cela est préconisé par l'USEPA (2006).

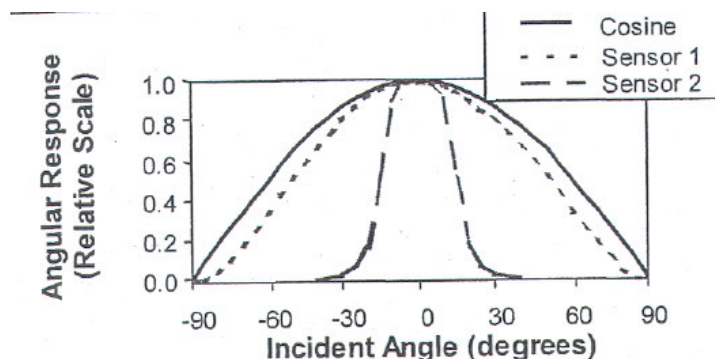


Figure B1 : Exemple de réponse d'un radiomètre idéal

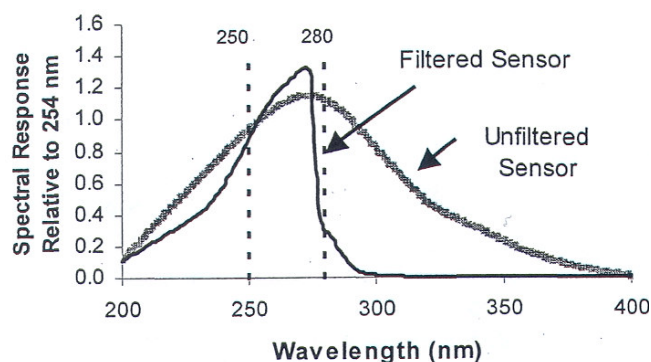


Figure B2 : Exemple de réponse des radiomètres du marché

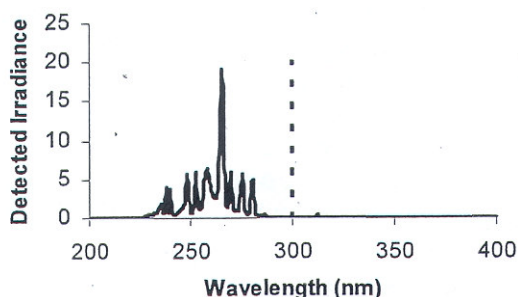


Figure B3 : Radiomètre avec filtre.
Pourcentage d'intensité
UV > 300 nm : 0,7 % du total

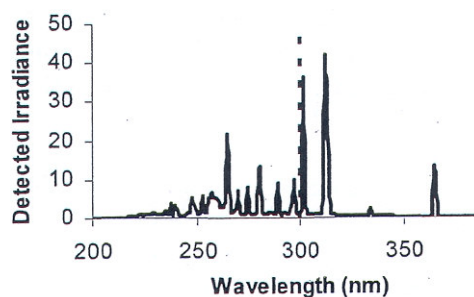


Figure B4 : Radiomètre sans filtre.
Pourcentage d'intensité
UV > 300 nm : 41 % du total

3. La fenêtre de mesure

Les fenêtres de mesure doivent être en matériau stable, résistant aux UV (ex : inox, PTFE). Les vitres en verre quartzéux doivent avoir un spectre de transmission tel que la transmission au-dessus de 250 nm soit supérieure ou égale à 90 %.

Pour les appareils qui équipent les réacteurs à moyenne pression, ils doivent de plus présenter une transmission supérieure ou égale à 85 % dans le champ spectral compris entre 200 et 250 nm.

La norme allemande DVGW W294-2 précise qu'un rayonnement supérieur à 300 nm ne doit pas contribuer à plus de 1 % du signal et un rayonnement inférieur à 240 nm pas à plus de 5 % (DVGW, 2006).

4. La linéarité

Elle doit s'étendre de 0,1 W/m² à 250 W/m² pour un rayonnement d'une longueur d'onde de 254 nm.

L'étendue de mesure du radiomètre de contrôle doit inclure la plage des éclairagements énergétiques admissibles. La plage comprise entre E1 et E2 doit être lisible par paliers de 3 % de l'étendue.

$$0,03 (E2-E1) > A < 0,03 E1$$

E1 : plus basse valeur d'éclairagement énergétique dans le domaine opératoire en W/m²

E2 : plus haute valeur d'éclairement énergétique dans le domaine opératoire en W/m^2

A : plus petite différence d'éclairement énergétique toujours lisible sur le dispositif d'affichage du radiomètre de contrôle (W/m^2).

Le fonctionnement des radiomètres doit être contrôlé régulièrement. La valeur affichée par les radiomètres placés sur les appareils doit être vérifiée par mesure comparative avec un radiomètre de référence. Pour les appareils avec des débits de plus de $100 m^3/h$, la norme allemande DVGW recommande un contrôle mensuel. Pour les autres appareils, un contrôle tous les 6 mois est recommandé. La valeur de mesure obtenue avec le radiomètre de rayonnements UV de fonctionnement ne doit pas dépasser de plus de 5 % la valeur mesurée avec le radiomètre de référence. Si la valeur affichée diffère de plus de 10 % de la valeur mesurée par le radiomètre de référence, un alignement de l'affichage peut être effectué. Après 10 000 heures d'utilisation, ou si l'écart est de plus de 20 % (ce qui représente déjà une valeur excessive) et au plus tard 2 ans après la mise en service du radiomètre, un étalonnage est nécessaire.

5. Les radiomètres de référence

Les exigences pour les radiomètres de référence sont fixées dans l'OENORM M 58731 :

- Ils doivent être étalonnés par un organisme de référence officiel, leur plage de mesure doit être comprise entre $0,1 W/m^2$ et $250 W/m^2$ à une longueur d'onde de $253,7 nm$.
- Leur incertitude doit être inférieure à 10 %.

Bibliographie annexe B

- DVGW, 2006a.** Technical standard W294-1 - Appareil de désinfection UV dans l'approvisionnement en eau - Partie 1 : exigences relatives à la qualité, au fonctionnement et à l'exploitation.
- DVGW, 2006b.** Technical standard W294-2 - appareil de désinfection UV dans l'approvisionnement en eau - Partie 2 : examen de la qualité, du fonctionnement et de l'efficacité de désinfection.
- DVGW, 2006c.** Technical standard W294-3 - appareil de désinfection UV dans l'approvisionnement en eau - Partie 3 : Fenêtres de mesure et capteurs pour la surveillance radiométrique d'appareils de désinfection UV - exigences, examen et étalonnage.
- OENORM, 2001.** Standard OENORM M5873-1 - Plants for the disinfection of water using ultraviolet radiation - requirements and testing - part 1: Low pressure mercury lamp plants.
- OENORM, 2003.** Standard OENORM M 5873-2 - Plants for the disinfection of water using ultraviolet radiation - requirements and testing - part 2: medium pressure mercury lamp plants. 40 p.
- US EPA, 2006.** UVGM-Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule.

Annexe C : Les mécanismes de photoréparation et de « dark-repair »

1. Photoréactivation

La photoréactivation permet aux micro-organismes jugés momentanément inactivés par des rayonnements UV de retrouver leur activité métabolique et/ou de cultivabilité par l'action d'enzymes spécifiques, les photolyases.

Cette famille est constituée de trois groupes (Todo, 1999) :

- les photolyases des dimères pyrimidiques cyclobutane (CPD-photolyase); elles-mêmes subdivisées en deux catégories : les CPD-photolyase de classe I et de classe II, suivant la séquence des amino-acides les constituant. Les photolyases de classe I concernent tous les micro-organismes alors que ceux de classe II concernent majoritairement les animaux et les végétaux (Weber, 2005) ;
- les (6-4) photolyases, retrouvées uniquement dans quelques espèces eucaryotes (Moreno de Lima-Bessa *et al.*, 2008) ;
- et les cryptochromes (CRY), retrouvés uniquement dans les végétaux, les animaux et l'Homme.

Ces photolyases ADN sont des protéines solubles de masse moléculaire comprise entre 55 000 et 65 000 daltons, présentes dans une variété d'organismes allant des bactéries aux eucaryotes multicellulaires. Toutes les photolyases contiennent au moins un chromophore qui est le dinucléotide d'adénine flavine (FAD) et la majorité d'entre elles contiennent un second chromophore qui est soit le méthényl-tétrahydrofolate (MTHF) (comme chez *Escherichia coli*), soit la 8-hydroxy-5-déazariboflavine (8-HDF) (Byrdin *et al.*, 2004), soit encore la flavine mononucléotide.

FAD présente une activité photochimique et joue un rôle direct dans le clivage des dimères. MTHF et 8-HDF sont des capteurs de photons auxiliaires qui transfèrent l'énergie absorbée vers FAD. Les photolyases possédant les deux chromophores (FAD + chromophore auxiliaire) sont les plus efficaces dans le clivage des dimères, et donc dans la réparation des lésions de l'ADN (Beukers *et al.*, 2008).

Pour réparer l'ADN inactivé, les photolyases doivent avoir le cofacteur FAD sous sa forme totalement réduite (FADH⁻). La présence du second chromophore n'est pas indispensable pour observer la réparation de l'ADN ; sa seule fonction est d'augmenter l'absorption de la lumière dans les domaines du proche UV et du visible où FADH⁻ absorbe très peu (Mu *et al.*, 2005) et de transmettre l'énergie acquise à FADH⁻ pour donner sa forme singulet excitée ^{*}FADH⁻. Ce transfert d'électron est très rapide : 134 picoseconde (ps) dans le cas de MTHF et 50 ps dans le cas 8-HDF. En l'absence de second chromophore, ^{*}FADH⁻ peut également être généré directement par photo-excitation de FADH⁻ (Weber, 2005).

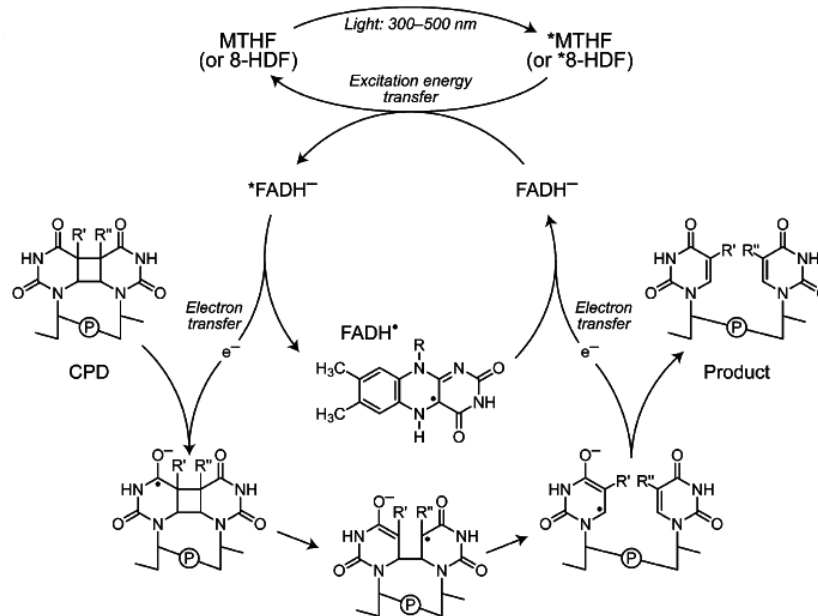


Figure C1 : Mécanisme de réparation des Dimères Pyrimidiques Cyclobutane (CPD) par la CPD-photolyase (Weber, 2005).

Une fois formée, $^{\bullet}\text{FADH}^{-}$ transfère un électron aux dimères cyclobutane pour générer 1 radical flavine semiquinone (FADH^{\bullet}) et 1 anion radicalaire CPD, en des temps très courts (de l'ordre de la centaine de picosecondes). Les liaisons C(5)-C(5'), puis les liaisons C(6)-C(6'), présentes dans cet anion radicalaire sont ensuite rompues, et les deux pyrimidines initiales sont ensuite régénérées ; tandis que FADH^{\bullet} est réactivée sous la forme FADH^{-} .

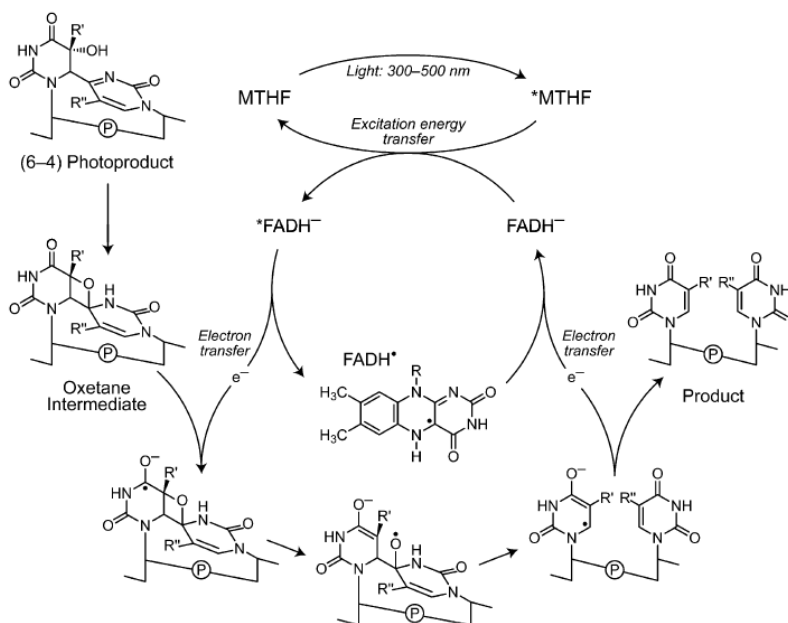


Figure C2 : Mécanisme de réparation des photoproduits (6-4) par la (6-4)-photolyase (Weber, 2005).

La capacité de réparation des micro-organismes est connue pour différer grandement suivant les espèces et les souches concernées.

2. Dark-repair

Il existe trois types différents de réparation indépendante de la lumière qui impliquent l'utilisation de différents enzymes, mais tous suivent le même mécanisme présenté sur la figure C3 :

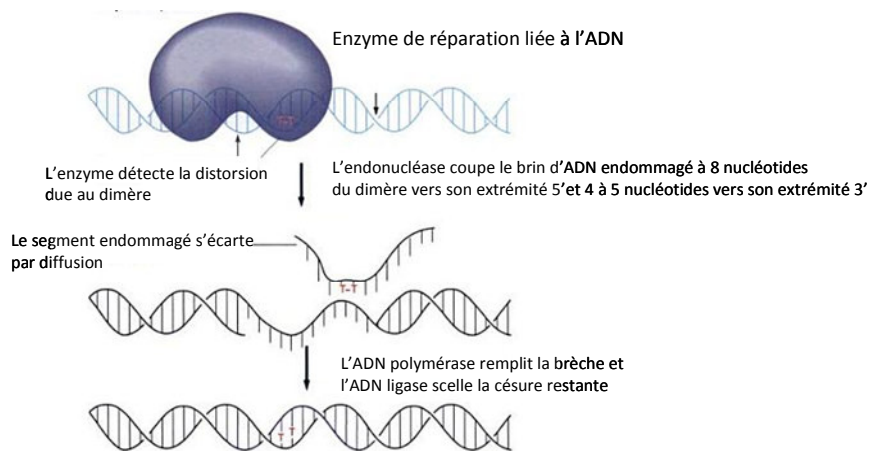


Figure C3 : Mécanismes de réparation par excision (Prescott et al., 2003). Réparation par excision d'un dimère de thymine qui provoque une déformation de la double hélice. L'endonucléase de réparation ou endonucléase UvrABC est codée par les gènes UvrA, B et C.

La réparation par recombinaison est un mécanisme important parce qu'il évite de bloquer la réplication pendant des heures dans l'attente de l'élimination des lésions par l'excision-resynthèse. Son rôle est d'autant plus important qu'elle permet la réparation de dommages non détectables par les mécanismes d'excision-resynthèse, telles que des altérations qui bloquent la synthèse d'ADN sans entraîner de distorsion de l'hélice. La réalité de la réparation par recombinaison a été démontrée chez les bactéries, par contre aucune certitude de son existence dans les cellules d'eucaryotes n'est acquise.

Les souches doubles mutantes $uvr^- recA^-$ d'*E. coli* qui sont déficientes à la fois dans le système d'excision resynthèse et dans la réparation par recombinaison, perdent toute capacité de réparation et ne peuvent éliminer la plupart des lésions. Dans de telles cellules, les tentatives de réplication produisent des fragments d'ADN dont la taille correspond à la distance attendue entre deux dimères de thymine. Ainsi il est montré que les dimères constituent un obstacle létal à la réplication quand la fonction RecA est déficiente et explique la raison pour laquelle un double-mutant ne peut tolérer plus d'un ou deux dimères dans son génome, alors qu'une cellule sauvage peut surmonter la présence d'une cinquantaine de dimères.

La protéine RecA intervient en formant un filament protecteur autour de l'ADN simple-brin de la brèche due au saut du système de réplication. Le complexe ADN simple brin - protéine RecA constitue un substrat qui permet d'apparier le simple brin avec un brin homologue, première étape de la recombinaison induite. La protéine RecA favorise ainsi l'accolement entre brins d'ADN qui va servir à restaurer la double-hélice.

Les mutants $recA^-$ sont presque complètement déficients à la fois dans la recombinaison génétique et dans la réponse réparatrice. En effet, la protéine RecA joue un rôle essentiel dans ces deux mécanismes, où elle assure la fonction de :

- l'échange de brins entre molécules d'ADN, une activité centrale dans la recombinaison,
- l'échange simple brin entre molécules néosynthétisées, impliqué dans la réparation par recombinaison.

Des mutations dans le gène *recA* et dans d'autres gènes *rec*, ont permis d'identifier des voies de réparation. Certains composants impliqués dans la réparation sont également impliqués dans la

recombinaison, mais ils ne sont pas tous exactement identiques puisque certaines mutations affectent un mécanisme mais pas l'autre.

Les propriétés de doubles mutants *recA recX*, *recA recY* et *recX recY* (*recX* et *recY* désignent ici deux gènes *rec* différents) suggèrent que *recA* interviendrait dans au moins deux voies différentes. L'une implique également les gènes *recB* et *recC*, qui codent pour deux sous-unités de l'exonucléase V, dont l'action est contrôlée par d'autres composants de cette voie, dont la protéine RecA elle-même. Le gène *recF*, dont la fonction est inconnue, identifie une autre voie de recombinaison et de réparation par recombinaison. En fait, malgré une avancée indéniable des recherches sur ces mécanismes, les détails moléculaires du processus de réparation par recombinaison ne sont toujours pas connus avec précision.

Bibliographie annexe C

Beukers R., Eker A.P.M. & Lohman P.H.M., 2008. 50 years thymine dimer. *DNA Repair* 7 (3), 530-543.

Byrdin M., Sartor V., Eker A.P.M., Vos M.H., Aubert C., Brettel K. & Mathis P., 2004. Intraprotein electron transfer and proton dynamics during photoactivation of DNA photolyase from *E. coli*: Review and new insights from an "inverse" deuterium isotope effect. *Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics* 1655 (1-3), 64-70.

Moreno de Lima-Bessa K., Armelini M.G., Chignaças V., Jacysyn J.F., Amarante-Mendes G.P., Sarasin A. & Martins Menck C.F., 2008. CPDs and 6-4PPs play different roles in UV-induced cell death in normal and NER-deficient human cells. *DNA Repair* 7, 303-312.

Mu W., Zhang D., Xu L., Luo Z. & Wang Y., 2005. Activity assay of His-tagged *E. coli* DNA photolyase by RP-HPLC and SE-HPLC. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods* 63 (2), 111-124.

Prescott L.M., Harley J.P., Klein D.A., Bacq-Calberg C.M. & Dusart J., 2003. Chapitre 11 Les gènes : structure, réplication et mutation dans "Microbiologie". De Boeck Université. p. pp.254-256.

Todo T., 1999. Functional diversity of the DNA photolyase/blue light receptor family. *Mutation Research - DNA Repair* 434 (2), 89-97.

Weber S., 2005. Light-driven enzymatic catalysis of DNA repair: A review of recent biophysical studies on photolyase. *Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics* 1707 (1 SPEC. ISS.), 1-23.

Annexe D : Contexte réglementaire et normatif

1. Réglementations des pays membres de l'union européenne

1.1 Allemagne

La réglementation des EDCH figure dans un document intitulé « Trinkwasserverordnung » du 21 mai 2001 (UBA, 2001). Un article de ce texte (§ 11) prévoit qu'une liste des produits et procédés autorisés pour la désinfection soit publiée par le ministère fédéral de la Santé. Cette liste a été mise à jour en décembre 2009 (UBA, 2009) et les procédés à rayonnements UV figurent dans la partie II de cette liste pour un usage de désinfection à des longueurs d'onde comprises entre 240 et 290 nm. La liste précise les règles techniques applicables qui sont les cahiers techniques DVGW W 294-1, W 294-2 et W 294-3 et fixe les exigences suivantes :

- seuls les appareils à rayonnements UV pour lesquels une efficacité de désinfection d'au moins 400 J/m^2 (selon la norme DVGW W 294-2) a été démontrée sont autorisés ;
- les caractéristiques de fonctionnement (débit maximum et force de rayonnement minimum correspondante) indiquées pour l'appareil dans le rapport d'essai ainsi que dans le certificat DVGW doivent être respectés durant l'utilisation du réacteur.

Des remarques précisent qu'il est possible de continuer à employer des appareils de désinfection par UV non certifiés jusqu'au 30 juin 2012 si leur efficacité de désinfection a été démontrée lors d'un test individuel ou dans des petites installations privées de production d'eau avec l'approbation des autorités compétentes. Les remarques précisent également que ces procédés ne sont pas applicables pour le maintien d'une capacité de désinfection dans le réseau de distribution.

Par ailleurs, la liste précise qu'en cas de désinfection d'eau de surface ou d'eau influencée par l'eau de surface, il convient de procéder à une élimination aussi large que possible des particules avant la désinfection et d'obtenir avant passage devant les rayonnements UV des valeurs de turbidité dans la plage de 0,1 à 0,2 NFU et si possible en deçà.

1.2 Autriche

La réglementation relative aux EDCH est décrite dans le livre autrichien des aliments chapitre B1 « eau potable » dont l'alinéa 4.5 mentionne les rayonnements UV comme un procédé fiable pour la désinfection. Il précise que la désinfection doit être vérifiée par l'absence, dans 250 mL, des bactéries *E.coli* et bactéries coliformes, Entérocoques, *Pseudomonas aeruginosa*, *Clostridium perfringens*, germes totaux à 22°C et 37°C. De plus l'alinéa 4.15 du chapitre B1 du livre autrichien des aliments donne des exigences quant à l'utilisation de cette technologie, notamment sur l'application de la dose de 400 J/m^2 , la longueur d'onde de 253,7 nm et la certification de l'appareil, il s'appuie sur les normes en vigueur en Autriche et précise :

- Sur la base des normes nationales fixant toutes les exigences pour la sécurité de la désinfection par les rayonnements UV, il est demandé notamment des résultats d'essai sur les procédés grandeur réelle de chaque type de réacteur ;
- Dans le cadre de la validation d'un réacteur UV, un test de biodosimétrie est exigé et permet de définir les paramètres de fonctionnement de chaque réacteur afin qu'il délivre une dose équivalente d'au moins 400 J/m^2 (flux d'eau (m^3/h), transmittance de l'eau (%), irradiance UV (W/m^2)). Ces données sont précisées dans les certificats donnés par l'OVGW (Austrian Association for water and gas) ;
- Les paramètres de fonctionnement doivent être enregistrés dans les usines de production d'eau et ils doivent correspondre à ceux précisés dans le certificat. Des alarmes sont définies au niveau de chaque site d'utilisation.

L'Autriche a également publié un texte officiel rappelant l'évolution des exigences depuis 1983 sur les technologies à rayonnements UV qui précise les modalités de gestion des « installations anciennes » et conclut que ces installations ne peuvent pas garantir une désinfection suffisante et déclare l'urgence de les remplacer (Bundesministerium für Gesundheit Familie und Jugend & Trinkwasser, 2007).

1.3 Royaume-Uni

Les EDCH sont réglementées par un texte s'appliquant à l'Angleterre et au Pays de Galles intitulé "the water supply (water quality) regulation 2001" avec différents amendements. Sa partie VII comprend les règlements 25 à 33 qui concernent le traitement de l'eau. Sur cette base, un système d'autorisation pour les produits et les procédés de traitement en contact avec les EDCH est en place et des lignes directrices spécifiques pour l'utilisation des réacteurs UV ont été éditées en février 2010 par le DWI (drinking water inspectorate). Ces lignes directrices rappellent que la limite maximale en turbidité pour une désinfection est de 1 NFU. Les biocides ajoutés pour maintenir une concentration résiduelle en désinfectant dans les canalisations de distribution doivent être ajoutés après l'étape de désinfection par les rayonnements UV.

Des points clés sont à vérifier pour la validation des appareils et notamment des essais complets de biodosimétrie. Les réacteurs doivent fonctionner dans les limites définies lors des essais. Des exigences minimales de suivi sont également définies et notamment le débit d'eau, l'état des lampes, la dose UV, la turbidité et le remplacement des lampes.

Tableau DIV : exigences minimales pour les essais de validation (DWI, 2010)

Exigences	Conditions
pour mener les essais :	<ul style="list-style-type: none"> • Débit • Dose UV (J/m² mesurée par des radiomètres UV) • Statut des lampes
pour la réalisation des essais de biodosimétrie :	<ul style="list-style-type: none"> • Essais sur le réacteur taille réelle, ou un réacteur exactement conforme à celui qui va être utilisé • Inactivation d'un micro-organisme test dont le comportement est parfaitement connu en fonction de la dose de rayonnements UV, c'est-à-dire qu'il a été mesuré de façon appropriée et est représentatif des revendications par rapport aux utilisations prévues
A connaître lors des essais de validation :	<ul style="list-style-type: none"> • Transmittance et absorbance de l'eau • Vieillesse des lampes et présence de dépôts sur les gaines • Incertitude de mesure des radiomètres de fonctionnement • Distribution de la dose de rayonnements UV découlant des différents profils de vitesse à travers le réacteur pour démontrer qu'en tout point du réacteur l'eau reçoit la dose minimale requise • Défaillance des lampes ou d'autre composante critique du réacteur • Configuration des canalisations d'entrée et de sortie du réacteur

Des recommandations pour le suivi et la vérification du procédé en usine sont précisées. Concernant la formation de sous-produits les indicateurs classiquement utilisés n'ont pas d'intérêt sur ce type de désinfection mais des produits de réactions photolytiques comme les nitrites peuvent apparaître. Les matériaux mis en œuvre dans les réacteurs doivent répondre aux exigences réglementaires et disposer d'une preuve de conformité sanitaire délivrée par le DWI. En cas de rupture d'une lampe

l'introduction de mercure dans les EDCH et une liste de facteurs de risques de rupture figurent dans les lignes directrices.

1.4 Irlande

Il n'existe pas de réglementation nationale pour l'autorisation des traitements applicable aux EDCH mais des exigences générales sont précisées dans le paragraphe 13 de la réglementation sur l'eau potable. Cependant les services compétents ont pour consigne de mettre en œuvre des produits et procédés figurant sur la liste du Royaume-Uni ou un système équivalent européen.

Pour les traitements à rayonnements UV qui se multiplient sur le territoire ces dernières années, l'Irlande demande que les systèmes répondent aux conditions suivantes :

1. Certificat de validation, le plus souvent basé sur les normes américaines ou allemandes pour les lampes, précisant les limites de la plage d'utilisation (débit/puissance des lampes) ;
2. Confirmation que le système dispose d'une alarme de fonctionnement de la lampe afin de vérifier en permanence qu'elle reste dans la plage de fonctionnement validée par le certificat précédent ;
3. Vérification sur des enregistrements que le système fonctionne dans les plages prévues par le biais d'enregistrements ;
4. Confirmation qu'un système de secours automatique est prévu en cas de dysfonctionnement afin de ne pas envoyer d'eau non désinfectée dans le réseau ;
5. Précisions sur les moyens permettant au producteur d'assurer que l'eau n'est pas contaminée dans les conduites puisqu'il n'y a pas de rémanence avec ce système de désinfection.

Par ailleurs, deux exigences de contrôle sont appliquées :

1. Si le traitement par rayonnements UV est demandé pour résoudre un problème de qualité de la ressource, le plan d'action doit correspondre aux préconisations de l'US-EPA et dans ce cas l'administration s'assure que les critères sont remplis avant d'autoriser les UV comme solution.
2. Lors d'un audit d'une filière de production d'eau comportant un système de désinfection aux rayonnements UV, l'administration vérifie que toutes les conditions sont remplies et si ce n'est pas le cas le producteur doit s'engager sur des solutions pour remplir les conditions exigées.

1.5 Suède

S'il existe une liste positive pour les produits de traitement de l'eau, il n'en existe pas pour les procédés. Des exigences générales sont indiquées dans l'ordonnance sur les EDCH (LIVSMEDELSVERKET, 2006) qui précisent que :

- les équipements de désinfection doivent être munis de systèmes d'alerte en cas de dysfonctionnement ;
- le responsable de la distribution doit vérifier que la désinfection est bien réalisée.

1.6 Portugal

Un système d'autorisation pour les produits et procédés utilisés en traitement des EDCH est en cours d'élaboration et un comité est prévu pour réaliser les évaluations. Les réacteurs UV sont encore peu utilisés.

1.7 Italie

La gestion des EDCH est gérée par un décret au niveau national en application de la directive européenne 98/83/CE. Son article 9 annonce le principe général relatif à l'innocuité des traitements mis en œuvre. Cependant le pays précise qu'il travaille à l'élaboration de règles plus strictes pour évaluer les risques liés aux produits et procédés de traitement mis en œuvre pour la production des EDCH. L'utilisation des réacteurs UV semble peu répandue dans ce pays pour la désinfection de l'eau.

1.8 Chypre

Le contrôle de la qualité des EDCH distribuées est considéré comme suffisant et il n'y a pas de réglementation nationale pour autoriser les produits et procédés de traitement pour les EDCH. Le texte réglementaire précisant les limites issues de la directive européenne 98/83/CE est intitulé « the quality of water intended to human consumption (monitoring and control) » Law 87(I)/2001. La désinfection par les rayonnements UV n'est pas utilisée pour le traitement de l'eau à Chypre.

1.9 Belgique

Les produits de traitement de l'eau sont réglementés et font l'objet d'une liste positive mais les procédés ne sont pas listés. Il n'existe pas de disposition réglementaire spécifique applicable aux réacteurs UV utilisés pour la désinfection de l'eau.

1.10 Slovénie

Aucune réglementation spécifique n'existe pour les procédés de traitement d'eau. Seuls les produits sont listés et une vérification du respect des limites microbiologiques de l'eau distribuée est réalisée par le contrôle et la surveillance.

2. Autres réglementations

2.1 Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

Dans les lignes directrices sur la qualité de l'EDCH éditées par l'OMS (OMS, 2008), sont données les doses de rayonnements UV permettant l'inactivation de différents micro-organismes (tableau DV).

Tableau DV : Pourcentages d'inactivation obtenus par irradiation aux rayonnements UV pour différents micro-organismes (OMS, 2008)

Micro-organisme	Inactivation
Bactéries	2 log pour 70 J/m ²
Virus	2 log pour 590 J/m ²
Protozoaires	
<i>Giardia</i>	2 log pour 50 J/m ²
<i>Cryptosporidium</i>	3 log pour 100 J/m ²

Dans le document sur les traitements de l'eau et le contrôle des pathogènes de l'OMS (OMS, 2006), le chapitre 3 est dédié à la désinfection et le chapitre 3.3.5 aux rayonnements UV et comprend les données présentées dans le tableau DVI.

Tableau DVI : Doses de rayonnements UV nécessaires pour obtenir des abattements de 4 log de différents micro-organismes (OMS, 2006)

Micro-organisme	Dose pour une inactivation de 4 log (J/m ²)	Origine de l'eau
Bactéries		
<i>Bacillus subtilis</i> spores	310	Laboratoire
<i>Escherichia coli</i>	200	Laboratoire
<i>Salmonella typhi</i>	300	Laboratoire
<i>Vibrio cholerae</i>	6,5	Laboratoire
Virus		
Phage MS2	500	1 eau souterraine
	640-930	11 eaux souterraines
	1000	Laboratoire
Coxsackie A	300	Laboratoire
Hépatite A	60-150	3 eaux souterraines
	160	Laboratoire
Poliovirus	230-290	8 eaux souterraines
	300	Laboratoire
Rotavirus- Wa	500	Laboratoire
Rotavirus SA11	400	Eau potable
Adénovirus	1860	4 études en laboratoire

2.2 Norvège

L'institut norvégien de santé publique (norwegian institut of public health – NIPH) indique sur son site internet en version anglaise que la désinfection de l'eau par les réacteurs UV est assez courante en Norvège, surtout sur les petits systèmes de distribution. Les réacteurs mettant en œuvre des lampes à basse pression et à moyenne pression sont reconnus. Depuis les années 1970, tous les systèmes approuvés ont été évalués par le NIPH afin de s'assurer qu'ils remplissent les conditions standards et la liste des réacteurs approuvée est disponible sur le site internet². Une dose supérieure à 400 J/m² obtenue par des essais de biodosimétrie est exigée pour la mise sur le marché, les protocoles allemand, autrichien et de l'US-EPA sont acceptés, les centres d'essais reconnus sont ceux reconnus pour ces trois normes car le pays ne dispose pas de centre d'essais national. L'efficacité d'abattement reconnue est de 6 log sur les bactéries d'intérêt sanitaire des EDCH, de 4 log sur les spores de bactéries d'intérêt et de 2 log sur les virus d'intérêt sous réserve que les conditions de fonctionnement permettant de délivrer la dose requise sont respectées.

² <http://www.fhi.no/>

2.3 Suisse

Le paramètre décisif pour la performance de la désinfection est la dose UV. A ce sujet, le SSIGE (Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux) a établi un règlement SSIGE W/TPW 152 (SVGW/SSIGE, 2008) en septembre 1998 qui prévoit pour les EDCH de suivre les normes allemandes et autrichiennes relatives aux dispositifs de désinfection de l'eau au moyen de rayonnements UV.

2.4 Nouvelle Zélande

La nouvelle Zélande dispose de trois documents édités par le ministère chargé de la santé concernant la désinfection par irradiation UV pour les EDCH. Elle ne reconnaît pas ce traitement pour la désinfection virale.

1. Les limites admissibles dans les EDCH (Ministry of Health, 2005) qui comportent au point 5.16 les critères d'efficacité sur *Cryptosporidium* obligatoires pour les réacteurs UV. La conformité aux normes allemandes ou autrichiennes ou encore à la partie 1 de la norme américaines pour une dose de 400 J/m² est reconnue. Si la démarche américaine (autre que partie 1) est suivie, pour être reconnues les lampes à basse pression doivent apporter la preuve de conformité pour une DRE de 360 J/m² et les lampes à moyenne pression pour une DRE de 420 J/m². Ce document décrit également des obligations lors de la mise en œuvre des réacteurs dont une filtration préliminaire obligatoire, une turbidité en entrée de 2,0 NFU maximale pendant 3 minutes maximum et moins de 5% de débit d'eau supérieure à 1,0 NFU (pour un contrôle en continu) ; une transmittance UV d'au moins 80% cm⁻¹ ; sur le débit minimum. Ce document indique également les points à vérifier par le producteur d'eau qui met en œuvre le réacteur ; il comporte enfin des obligations d'autocontrôle en fonction de la taille de la population desservie.
2. Les lignes directrices pour la gestion de la qualité de l'eau (Ministry of Health, 2005) comporte dans son chapitre 15 sur les procédés de traitements mis en œuvre pour la désinfection de l'eau un point 15.5.5 sur les rayonnements UV. Ce document souligne l'absence de sous-produits dangereux référencés aux doses de traitements mises en œuvre et la nécessité de caractériser les effets du traitement sur la matière organique et les éventuels effets sur la santé qui pourraient y être associés. Il précise que des recherches sont toujours nécessaires même si le procédé est reconnu pour son efficacité, notamment sur les phénomènes de photo-réparation. Ce document souligne la difficulté de valider un réacteur étant donné le nombre d'incertitudes cumulées (répartition du flux d'eau dans le réacteur, réponse du radiomètre suivant l'angle de la lumière, les différentes qualités d'eaux et la variation de puissance des lampes). Ce document précise que le fournisseur de la lampe doit indiquer combien d'heures elle peut fonctionner, à quelle puissance, appliquer une réduction sur cette puissance après environ 100h de fonctionnement et un nombre maximum d'allumage par jour. Ce document reprend les limites sur la qualité de l'eau entrante en les détaillant et indique notamment qu'aucune trace de permanganate et d'ozone ne doivent être présentes. Ce document présente également des éléments relatifs à la conception des réacteurs, à leur installation, sur leur contrôle et leur mise en œuvre.
3. Le plan guide pour la gestion des risques en Santé Publique (Ministry of Health, 2001) comporte une fiche sur les procédés de traitement dédiée à la désinfection par irradiation UV. Ce document présente les causes, les mesures préventives, les moyens de contrôle de ces mesures préventives : les paramètres à contrôler et les limites nécessitant une action corrective et enfin les actions correctives à mettre en œuvre. Ce tableau recense 6 causes de niveau haut et une de niveau moyen.

2.5 USA

La « Long term 2 enhanced surface water treatment rule (LT2ESWTR) » de janvier 2006 (USEPA, 2006) renforce le contrôle des micro-organismes pathogènes dans les EDCH. Il reconnaît les rayonnements UV comme technique de désinfection et leur accorde un crédit d'abattement en fonction de la dose délivrée, des essais de validation du réacteur et des conditions de sa mise en œuvre. Les abattements reconnus sont repris dans le tableau DVII.

Tableau DVII : crédit d'abattement et dose UV nécessaire pour *Cryptosporidium*, *Giardia lamblia* et les virus (USEPA, 2006)

Crédit d'abattement en log	<i>Cryptosporidium</i> dose UV en J/m ²	<i>Giardia lamblia</i> dose UV en J/m ²	Virus dose UV en J/m ²
0,5	16	15	390
1,0	25	21	580
1,5	39	30	790
2,0	58	52	1000
2,5	85	77	1210
3,0	120	110	1430
3,5	150	150	1630
4,0	220	220	1860

Le paragraphe 141.716 de la LT2ESWTR reprend les exigences pour l'utilisation d'un réacteur UV, notamment sur la longueur d'onde biocide, l'encrassement des lampes, l'incertitude des radiomètres UV, les profils de vitesse dans le réacteur, etc. Les conditions de validation sont décrites dans ce texte ainsi que les modalités de suivi pour l'autocontrôle du producteur d'eau. Il exige notamment que 95 % de l'eau traitée tous les mois soit produite dans des conditions permettant d'assurer que la dose requise a bien été respectée.

L'US-Environmental Protection Agency a produit différents documents en avril 1999 un guide sur les oxydants et les désinfectants alternatifs (USEPA, 1999) dont le chapitre 8 est dédié aux rayonnements UV et détaille les éléments d'un réacteur, sa conception et les paramètres à prendre en compte comme la transmittance de l'eau. Ce document reprend également les données sur l'efficacité des rayonnements UV sur l'entretien des réacteurs. Il signale que le traitement est incompatible avec les eaux présentant de fortes concentrations en fer, calcium, turbidité et phénols. Et qu'il doit être appliqué juste avant le réseau de distribution. L'organisme a également édité des lignes directrices pour la validation des réacteurs UV dans le cadre de la LT2ESWTR en 2006.

L'Institut national de recherche sur l'eau (NWRI) a également édité en 2003 des lignes directrices pour la désinfection par rayonnements UV des EDCH et pour la réutilisation de l'eau (seconde édition) (NWRI-AWWARF, 2003).

Le pays dispose d'une norme NSF/ANSI (national science foundation / american national standards institut) sur le traitement microbiologique aux rayonnements UV des systèmes de traitement d'eau référencée NSF/ANSI 55 – 2007 (NSF/ANSI, 2007).

2.6 Québec

Le Québec dispose d'une procédure d'analyse des technologies de traitement des EDCH mis à jour régulièrement. Ce document rappelle que tout projet d'établissement ou de modification d'une installation de production d'EDCH fournissant plus de 20 personnes doit recevoir une autorisation du ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEP) en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement. Un guide de conception des installations de production et des systèmes de distribution des EDCH est également disponible pour aider les différents intervenants lors du processus d'autorisation.

1. Le document détaillant la procédure d'autorisation (MDDEP, 2008) précise qu'un comité sur les technologies de traitement d'eau potable (CTTEP) est en charge de l'examen des dossiers de demande d'autorisation et émet des fiches d'évaluation technique. En pré-requis pour faire une demande d'autorisation la technologie de traitement doit permettre d'atteindre les normes réglementaires ou les recommandations en absence de norme, pour la qualité des eaux potables. Afin d'être autorisé un procédé doit répondre à 4 niveaux de développement : expérimental, échelle pilote, échelle réelle, éprouvé, avec pour chacun des objectifs, des exigences sur le rejet des eaux traitées, des critères d'évaluation et pour les niveaux échelle réelle et éprouvé une obligation d'obtenir une autorisation du MDDEP pour un projet et un nombre limite d'installations pour le niveau échelle réelle. Les fiches précisent les paramètres critiques pour l'eau avant traitement. L'annexe B de ce document concerne en partie les réacteurs UV et exige une validation par une méthode biodosimétrique reconnue afin de confirmer la dose effective fournie par un réacteur dans différentes conditions de fonctionnement. Le fabricant doit fournir les résultats de ces essais et préciser le protocole utilisé et l'organisme indépendant ayant supervisé les essais. Les protocoles référencés sont l'allemand (DVGW-W294), l'autrichien (OENORM M 5873-1) et l'américain (NWRI-AWWARF et NSF 55). Le protocole de l'US-EPA (UVGM) dans ses versions 2003 et 2006 est éventuellement reconnu.
2. le guide de conception des installations comporte un chapitre 10 (MDDEP, 2006) relatif à la désinfection et au contrôle des sous-produits qui précise la réduction minimale obligatoire à obtenir sur les différents types d'eau brute et suivant les organismes cibles (*Cryptosporidium*, *Giardia* et virus). Il existe également des objectifs additionnels pour les eaux de surface (ou influencées par des eaux de surface) en fonction de leur concentrations en coliformes totaux. Ce document présente un tableau comparatif des différents modes de désinfection et les rayonnements UV sont présentés comme ayant un excellente efficacité envers *Cryptosporidium*, une très bonne efficacité sur *Giardia* et une efficacité acceptable sur les virus. Le point 10.4.5 est consacré aux rayonnements UV. Il précise que le système doit être appliqué au point de la chaîne de traitement où la transmittance UV de l'eau est la plus élevée et où l'encrassement des lampes est réduit au minimum. Il détaille également les doses de conception pour les réacteurs, à savoir les doses, en fonction du type d'eau, pour atteindre un abattement de 3 log en protozoaires et 2 ou 4 log en virus ; les doses nécessaires vont de 400 J/m² à 1200 J/m². Il est indiqué que pour atteindre 800 J/m² par exemple, le concepteur utilise 2 réacteurs validés à 400 J/m² en série ou déduit de 25% le débit maximal permis pour un réacteur validé à 600 J/m². Ce document indique également le suivi et les alarmes dont doivent être équipés les réacteurs. Concernant l'encrassement des lampes, il précise que l'eau à traiter ne doit pas dépasser les limites suivantes : 0,3 mg/L pour le fer, 120 mg/L pour la dureté et 0,05 mg/L pour le manganèse.

Bibliographie annexe D

- Bundesministerium für gesundheit familie und jugend & Trinkwasser.** Österreichisches Lebensmittelbuch, IV Auflage, codex kapitel B1 Trinkwasser - livre autrichien des aliments chapitre B1 Eau potable.
http://www.bmg.gv.at/cms/site/attachments/4/9/6/CH0832/CMS1167207128242/codexkapitel_b_1_trinkwasser.pdf
- Bundesministerium für gesundheit familie und jugend & Trinkwasser, 2007.** Richtlinie - UV-Desinfektionsanlagen in Wasserverorgungsanlagen gemäß Trinkwasserverordnung.
- Code de la consommation,** http://www.legifrance.gouv.fr/telecharger_pdf.do?cidTexte=LEGITEXT000006069565
- Code de la santé publique,** http://www.legifrance.gouv.fr/telecharger_pdf.do?cidTexte=LEGITEXT000006072665
- CSHPF, 2001.** Guide du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) de novembre 2001 relatif à la gestion du risque lié aux légionelles.
- DGS, 1990.** Circulaire DGS/VS4 du 7 mai 1990 relative aux produits et procédés de traitement des eaux destinées à la consommation humaine.
- DGS, 2000.** Circulaire DGS/VS4 n° 2000-166 du 28 mars 2000 relative aux produits et procédés de traitement des eaux destinées à la consommation humaine.
- DGS, 2002.** Circulaire du 22 avril 2002 relative à la prévention du risque lié aux légionelles dans les établissements de santé pour le traitement des eaux chaudes sanitaires dans les réseaux intérieurs d'immeubles ou d'établissements de santé
- DGS, 2004.** Circulaire DGS/SD7A/2004/557 du 25 novembre 2004 relative aux mesures correctives à mettre en œuvre pour réduire la dissolution du plomb dans l'eau destinée à la consommation humaine
- DGS, 2006.** Circulaire DGS/7A/2006/127 du 16 mars 2006 relative aux procédés de traitement d'eau destinée à la consommation humaine, à l'exclusion d' « eau minérale naturelle » et d' « eau de source », mettant en œuvre des supports de filtration recouverts d'oxydes métalliques
- DGS, 2007a.** Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique.
- DGS, 2007b.** Arrêté du 17 août 2007 relatif à la constitution du dossier de demande de mise sur le marché d'un produit ou d'un procédé de traitement d'eau destinée à la consommation humaine, mentionné à l'article R.1321-50-IV du code de la santé publique modifié par arrêté du 4 juin 2009.
- DGS, 2007c.** Décret n°2007-49 du 11 janvier 2007 relatif à la sécurité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine.
- DVGW, 2006a.** Technical standard W294-1 - Appareil de désinfection UV dans l'approvisionnement en eau - Partie 1 : exigences relatives à la qualité, au fonctionnement et à l'exploitation.
- DVGW, 2006b.** Technical standard W294-2 - appareil de désinfection UV dans l'approvisionnement en eau - Partie 2 : examen de la qualité, du fonctionnement et de l'efficacité de désinfection.
- DVGW, 2006c.** Technical standard W294-3 - appareil de désinfection UV dans l'approvisionnement en eau - Partie 3 : Fenêtres de mesure et capteurs pour la surveillance radiométrique d'appareils de désinfection UV - exigences, examen et étalonnage.
- DWI, 2010.** Guidance on the use of Ultraviolet (UV) irradiation for the Disinfection of Public Water Supplies.
- LIVSMEDELSVERKET, 2006.** Vägledning dricksvatten föreskrifterna.
- MDDEP, 2006. chapitre 10.** Désinfection et contrôle des sous-produits. In *Guide de conception des installations de production d'eau potable (Guide de conception)*.
- MDDEP, 2008.** Procédure d'analyse des technologies de traitement en eau potable
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/procedure-analyse-comite.pdf> p.
- MDDEP, 2009.** Loi sur la qualité de l'environnement modifiée.
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/loi42/index.htm>
- Minister for the Environment, Heritage and Local Government, 2007.** Statutory instruments. Européen communities (Drinking water) (NO.2) Regulations 2007 - Réglementation sur l'eau potable.
<http://www.environ.ie/en/Legislation/Environment/Water/FileDownload,14547,en.pdf>

- Minister for Environment, Sustainability and Housing, 2007.** The water supply (water quality) regulation 2001 (Amendment) Regulations 2007.
http://www.dwi.gov.uk/stakeholders/legislation/ws_wqregs2001amend2007.pdf
- Ministry of Health, 2001.** Public Health Risk Management Plan Guide Treatment Processes - Ultraviolet Irradiation Disinfection.
- Ministry of Health, 2005a.** treatment processes, disinfection. In *Draft Guidelines for drinking-water Quality Management for New Zealand*. p. 15-11 à 15-49.
- Ministry of Health, 2005b.** *Drinking-water Standards for New Zealand 2005*.
- Ministro della sanita, 2001.** Decreto Legislativo 2 febbraio 2001, n. 31 Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualita' delle acque destinate al consumo umano - décret au niveau national en application de la directive européenne 98/83/CE.
<http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/01031dl.htm>
- NIPH. Norwegian institut of public health (Institut norvégien de santé publique).** Liste des réacteurs UV approuvés
http://www.fhi.no/eway/default.aspx?pid=238&trg=MainLeft_5853&MainArea_5811=5853:0:15,2828:1:0:0:::0:0&MainLeft_5853=5825:44927::1:5857:1:::0:0
- NSF/ANSI, 2007.** NSF-ANSI 55 - appareils à rayonnements UV pour le traitement de la contamination microbiologique de l'eau p.
- NWRI-AWWARF, 2003.** lignes directrices pour la désinfection par rayonnements UV des EDCH et pour la réutilisation de l'eau p.
- OMS et IWA, 2004.** Pathogen Control Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water.
- OMS, 2008.** *Guidelines for Drinking-water Quality - third edition - incorporating the first and second addenda - volume 1 - Recommendations* p.
- OENORM, 2001.** Standard OENORM M5873-1 - Plants for the disinfection of water using ultraviolet radiation - requirements and testing - part 1: Low pressure mercury lamp plants.
- Republic of Cyprus, 2001.** Law 87(I)/2001 the quality of water intended to human consumption (monitoring and control).
http://www.moh.gov.cy/moh/mphs/phs.nsf/DMLlegislation_en/DMLlegislation_en?OpenDocument
- SVGW/SSIGE, 2008.** *Anforderungen an Anlagen zur Desinfektion von Wasser mittels Ultraviolet-Strahle / Exigences liées aux dispositifs de désinfection de l'eau au moyen de rayons ultraviolets* p.
- UBA, 2001.** Ordinance Amending the Drinking Water Ordinance.
- UBA, 2009.** Liste der Aufbereitungsstoffe und Desinfektionsverfahren gemäß § 11 Trinkwasserverordnung 2001.
- US EPA, 1999.** Ultraviolet radiation. In *EPA Guidance Manual - Alternative Disinfection and Oxidants*. p. 8-1 à 8-25.
- US EPA, 2006a.** Rules and Regulations Federal register 71, 776, 778, 783-786.
- US EPA, 2006b.** UVGM-Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule.

Annexe E : les technologies émergentes

1. Les lampes

1.1 Diodes Electro-Luminescentes (DEL)

Conception et spectre d'émission

Les Diodes Electro-Luminescentes (DEL ou Light-Emitting Diodes –LED- en anglais) sont des composants semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont traversés par un courant, émettent de la lumière, avec une énergie en général proportionnelle à l'énergie du courant.

Cette émission de lumière se fait grâce à la recombinaison radiative de paires électrons-trous dans des hétéro-jonctions de type p-n (figure E1).

Les premières diodes réalisées dans les années 60 étaient constituées d'alliage Ga/Al/As (Arséniure de Gallium Aluminium) et de GaAs (Arséniure de Gallium), dont les caractéristiques limitaient les couleurs disponibles au rouge et à l'infrarouge. Ce n'est que dans les années 90 que sont apparus de nouveaux matériaux à base de nitrure (GaN, AlGaN, InGaN) donnant accès à des longueurs d'ondes plus courtes, telles que le vert, le bleu et jusqu'au proche UltraViolet.

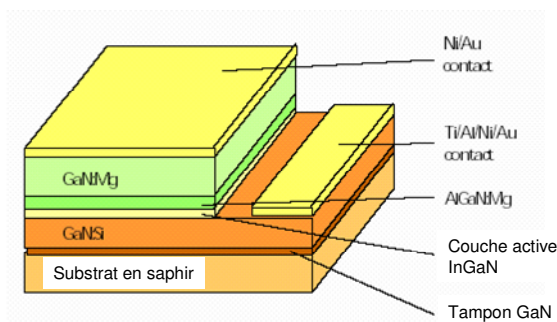


Figure E1 : Hétéro-jonctions au sein des DEL permettant d'obtenir des radiations de longueur d'onde variées

Les DEL sont à la base des émetteurs dits lambertiens, c'est-à-dire que la lumière est émise de façon égale dans toutes les directions. Une des différences d'utilisation des DEL en éclairage par rapport aux sources plus classiques est que la puissance élémentaire de chaque source est faible, donc la puissance s'obtient en multipliant les sources élémentaires. Une des conséquences, liée aux lois de l'optique, est que pour former un faisceau directif, chaque source doit disposer de sa propre optique (lentille plate, hémisphérique, en forme de dôme, en forme de balle). Cette optique peut être moulée directement sur la diode ou rapportée devant la diode.



Figure E2 : Exemples de DEL avec lentille dôme et lentille plate (www.biouvled.com)

Ce n'est que très récemment qu'ont été mises au point des DEL dans l'UV-C proche (250 nm). Il existe donc sur le marché toute une gamme de DEL opérant entre 255 et

405 nm. De part la nature des métaux qui les composent, elles sont toutes monochromatiques.

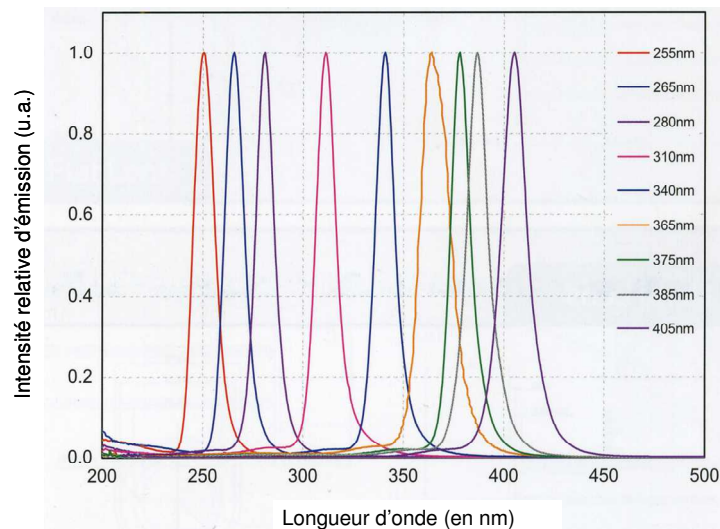


Figure E3 : Spectre des LED actuellement sur le marché

Caractéristiques techniques des DEL

Les DEL ont des caractéristiques physiques qui en font de potentielles sources de rayonnements UV pour la désinfection des eaux.

Tout d'abord, elles affichent une durée de vie beaucoup plus longues que les lampes à mercure traditionnelles (100 000 heures au minimum contre 10 000 heures pour des lampes à rayonnements UV à basse pression) (Crawford *et al.*, 2005).

Elles ne contiennent pas de substances toxiques comme le mercure par exemple pour les lampes à rayonnements UV classiques. Elles consomment moins d'énergie électrique et le rendement énergie électrique/émission lumineuse est important. En effet, elles n'émettent pas de chaleur : la puissance électrique est donc entièrement dédiée aux radiations lumineuses (Vilhunen et Sillanpää, 2009).

Leurs dimensions réduites (entre 10 et 15 cm de longueur, et entre 2 et 10 cm de largeur), la nature des matériaux constituant l'optique (verre dopé contre quartz pour les lampes au mercure), et la possibilité d'utiliser uniquement les longueurs d'onde requises en font des sources de rayonnements UV de substitution aux lampes mercure classiques. En effet, elles sont moins fragiles que les lampes à rayonnements UV classiques et leurs petites tailles permet d'imaginer des nouvelles conceptions de réacteurs, permettant d'assurer un contact rayonnements UV-flux d'eau à traiter optimisé en ajustant le nombre de DEL et leurs longueurs d'ondes.

Toutefois, pour concevoir un réacteur traitant des débits importants, il sera nécessaire d'utiliser de nombreuses DEL. Or, leur coût est encore actuellement très élevé. Ceci explique qu'il n'existe pas encore sur le marché de réacteurs UV à DEL pour la désinfection des eaux en usines de potabilisation. A signaler toutefois, une usine d'eaux usées à Hong-Kong qui utilise depuis 2003 un réacteur UV à DEL en traitement tertiaire (Close *et al.*, 2006).

Les applications actuelles concernent donc uniquement de petits volumes ou des petits débits à traiter (micro et nanoélectronique, laboratoires biologiques et médicaux, etc.).

Une étude du Sensor Electronic Technology Inc. (SETI) (Reed *et al.*, 2008) montre que le prix des DEL ne cesse de diminuer, et estime qu'à partir de 2014, le coût des DEL à 255 nm devrait atteindre les prix actuels des DEL à 365 nm.

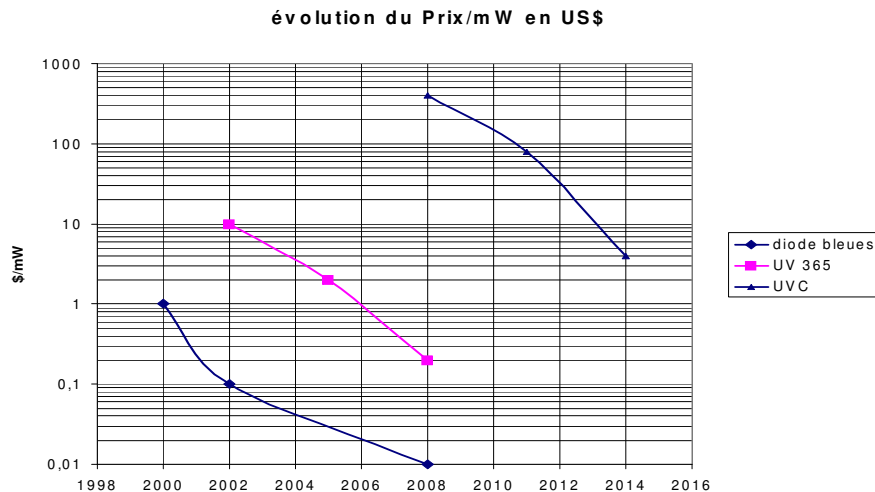


Figure E4 : Évolution des prix des DEL (Reed et al., 2008)

Efficacité en désinfection

Il existe très peu d'articles scientifiques se focalisant sur l'utilisation des DEL pour la désinfection des eaux (4 articles).

Hamamoto *et al.*, 2007, utilisent une DEL UV haute énergie (jusqu'à 504 J/cm²) émettant à la longueur d'onde de 365 nm et testent son efficacité sur 5 bactéries : *Escherichia coli* DH5 α , *Escherichia coli* entéropathogènes (EPEC), *Vibrio parahaemolyticus*, *Staphylococcus aureus* et *Salmonella enterica*. Les abattements atteignent 5,7 log pour la première en 75 minutes (à 315 J/cm²), 5,2 log pour les 3 suivantes en 60 minutes (à 252 J/cm²) et 3,4 log pour la dernière (à 504 J/cm²). Les mêmes auteurs, dans une autre publication (More *et al.*, 2007), montrent aussi l'effet de la température et du pH sur l'efficacité de la désinfection. Il ressort que les optima de température et de pH sont respectivement de 20 °C et pH 8.

Les mêmes auteurs (Mori *et al.*, 2006) ont utilisé ces mêmes DEL à 365 nm (15 mW.s/cm² soit 150 J/m²), en mode statique, mais en utilisant un dispositif avec 8 DEL en séries. Les résultats montrent une efficacité germicide de 100% pour *Escherichia coli* (en 30 minutes) et pour *Vibrio parahaemolyticus* (en 10 minutes). Cependant, il n'est pas fait état dans cette publication du dénombrement initial de bactéries.

Vilhunen et Sillanpää, 2009, ont étudié l'efficacité de DEL émettant aux longueurs d'ondes de 269 et 276 nm pour l'inactivation de *Escherichia coli*. Les essais ont été menés en mode statique avec une teneur initiale en bactéries de 10⁷ UFC/cm³. Après 25 minutes, il est montré que l'abattement est de 7 log, pour les deux longueurs d'ondes. L'efficacité est réduite lorsque le milieu est turbide : (abattement de 4 log en 25 minutes pour une turbidité de 1,45 NTU).

A l'inverse, il existe plus d'une vingtaine de brevets internationaux qui portent sur l'utilisation de DEL pour la désinfection de l'eau. Ces brevets portent aussi bien sur des systèmes portables de désinfection (Maiden, 2003, 2006 ; Levy, 2006) que sur des réacteurs permettant de traiter des volumes et des débits importants (Schlesser et Lemunyon, 2009 ; Harbers, 2006 ; Knight *et al.*, 2009) mais aucune donnée scientifique sérieuse n'accompagne ces brevets.

1.2 Les lampes à cathode creuse

Conception et spectre d'émission

Les lampes à cathode creuse sont des lampes à décharge où la cathode est l'enveloppe (figure E5). Les auteurs (Soloshenko *et al.*, 2006) ont utilisé différents gaz (air, oxygène, vapeur d'eau, mélange deutérium oxygène) à basse pression. Ils ont comparé les spectres d'émission de chacun de ces gaz ou mélange avec celui d'une lampe à vapeur de mercure classique (figure E6). Hormis la lampe à air (a) qui présente plusieurs maxima de longueurs d'ondes entre 215 et 270 nm, les autres gaz émettent principalement dans l'UV lointain au voisinage de 220 nm.

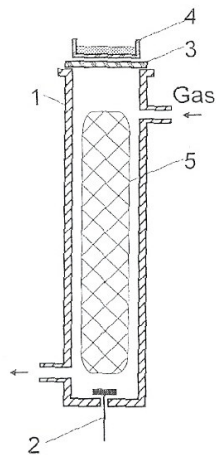


Figure E5 : Schéma du dispositif expérimental.

(Soloshenko et al., 2006).

- 1- enveloppe cathode
- 2- anode
- 3- fenêtre de quartz KU-1
- 4- disque de Pétri en quartz KU-1
- 5- décharge de plasma

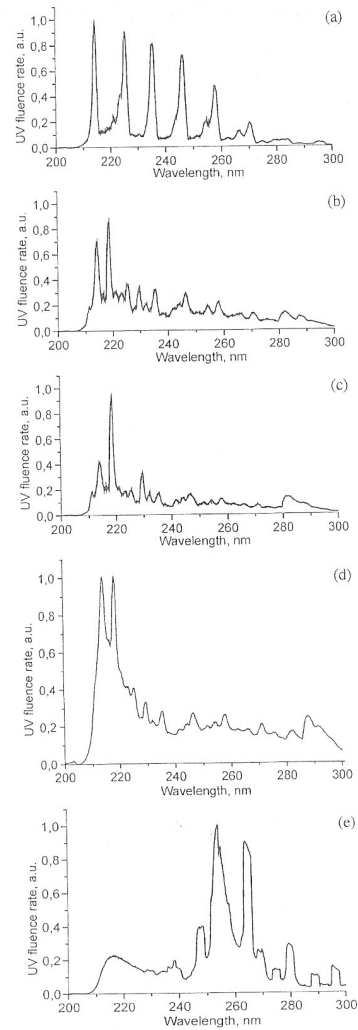


Figure E6 : Spectres d'émission de lampes à cathode creuse, contenant différents gaz

(NB : les intensités d'irradiation ont été normées)

(Soloshenko et al., 2006)

- (a) air à la pression de 0,2 torr
- (b) oxygène (0,1 torr)
- (c) vapeur d'eau (0,1 torr)
- (d) mélange deutérium (0,35 torr) et oxygène (0,08 torr)
- (e) lampe à vapeur de mercure

Efficacité en désinfection

Les lampes à cathode creuse présentent une meilleure efficacité sur *E. Coli* que les lampes à mercure (figure E7) en raison de la gamme de longueurs d'onde générée.

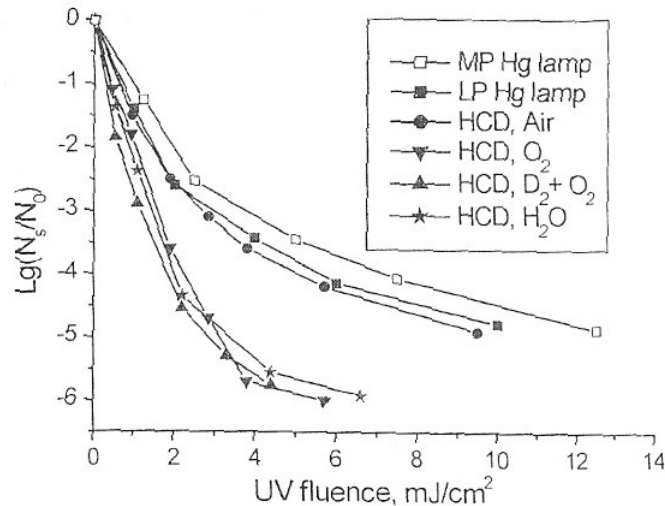


Figure E7 : Courbes de survie lors de l'irradiation d'une suspension aqueuse de $2 \cdot 10^6$ UFC/mL d'*Escherichia coli*.

Taux de réduction de *E. Coli* en fonction de la dose d'exposition aux rayonnements UV émis par les lampes à vapeur de mercure DB-30, PRK-400 et par rayonnement HCD dans de l'air, de l'oxygène, de la vapeur d'eau et dans un mélange de deutérium et d'oxygène. (Soloshenko et al., 2006)

1.3 les lampes à décharge

Conception et spectre d'émission

Les lampes à décharge de type « excimère » sont constituées d'une électrode interne et d'une électrode située à l'extérieur d'une enveloppe de quartz. Cette électrode est perforée de manière à laisser passer les rayonnements UV (figure E8).

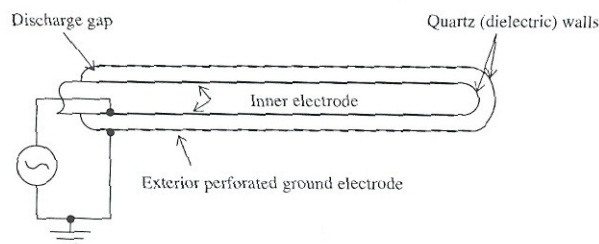


Figure E8 : Configuration cylindrique d'une lampe excimère à décharge à barrière diélectrique (d'après Naunovic, 2008)

Plusieurs gaz ou mélanges gazeux peuvent être utilisés. Naunovic et al. (2008) ont travaillé avec un mélange Xe – Br émettant au voisinage de 280 nm.

La figure E9 présente les spectres d'émission de divers gaz rares et de mélanges avec des halogènes (Sosnin et al., 2006). Cet auteur compare l'effet d'une décharge à « barrière » (B-A) et d'une décharge capacitive (D-A)

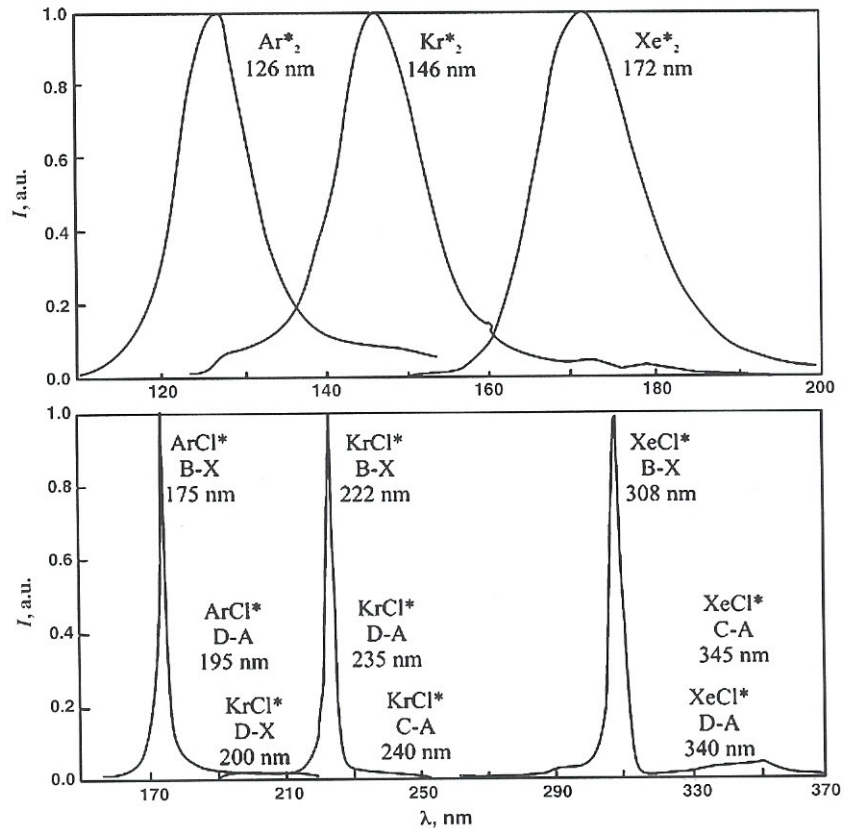


Figure E9 : Spectres d'émission de divers gaz rares purs et de mélanges de gaz rares avec des halogènes (Sosnin et al., 2006)

Efficacité vis-à-vis de la désinfection

Les lampes à décharge montrent une efficacité relativement faible sur l'inactivation des spores de *B. subtilis*. Pour améliorer l'efficacité de l'irradiation, les auteurs de l'étude ont disposé un déflecteur en spirale (figure E10) autour de la lampe. Toutefois, l'efficacité reste à peine satisfaisante à faible débit et décroît rapidement lorsque le débit augmente (figure E11).

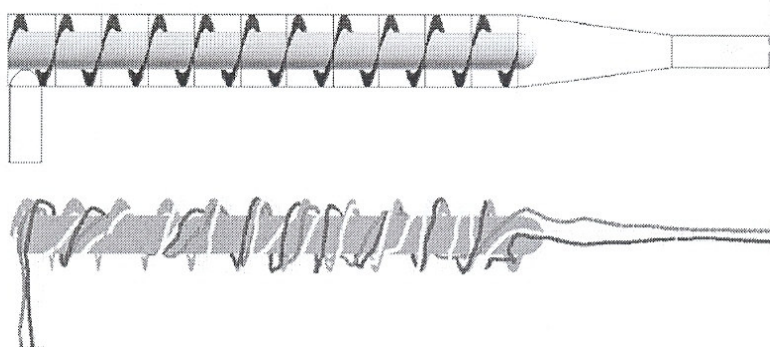


Figure E10 : Exemple de réacteur équipé d'un déflecteur en spirale (d'après Naunovic et al., 2008)

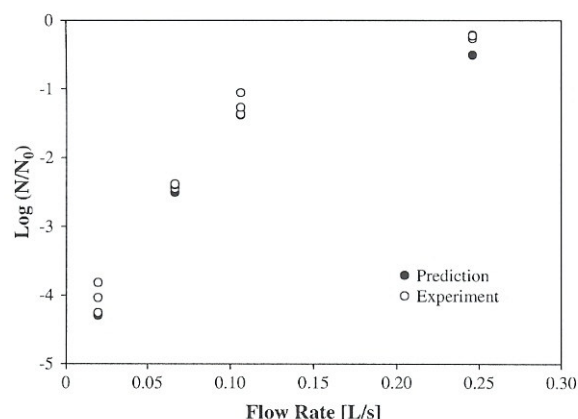


Figure E11 : Comparaison entre l'inactivation mesurée et calculée par simulation numérique de spores de *B. subtilis* pour un réacteur équipé de lampes excimères et un T_w de 99% (Naunovic et al., 2008)

1.4 Conclusion sur les lampes

Des études visant à remplacer les lampes à vapeur de mercure (qui peuvent engendrer des pollutions) par d'autres types de source de rayonnements UV, montrent une certaine efficacité notamment avec des DEL qui émettent à la longueur d'onde de 365 nm ou des lampes à décharges émettant à la longueur d'onde de 280 nm. Les lampes à cathode creuse sont efficaces mais leur spectre d'émission centré vers la longueur d'onde de 210 nm peut laisser craindre la formation de sous-produits. Les études publiées à ce jour ne portent pas sur les conséquences chimiques de l'irradiation.

2. Les nouvelles configurations

Outre les études citées ci-dessus visant à remplacer les lampes à vapeur de mercure, certains auteurs ont envisagé de nouvelles configurations pour améliorer le rendement d'irradiation.

2.1 Les fibres optiques

Un système utilisant des fibres optiques pour acheminer les rayonnements UV de la lampe vers le réacteur peut constituer une réelle amélioration du rendement des réacteurs.

Lu a étudié l'emploi de fibres optiques pour « transporter » le rayonnement de la lampe à mercure vers le réacteur (Lu et al., 2008). Le système consiste à focaliser le rayonnement émis sur l'extrémité d'un fagot de fibre qui acheminent le rayonnement dans l'ensemble de la chambre de contact (figure E12).

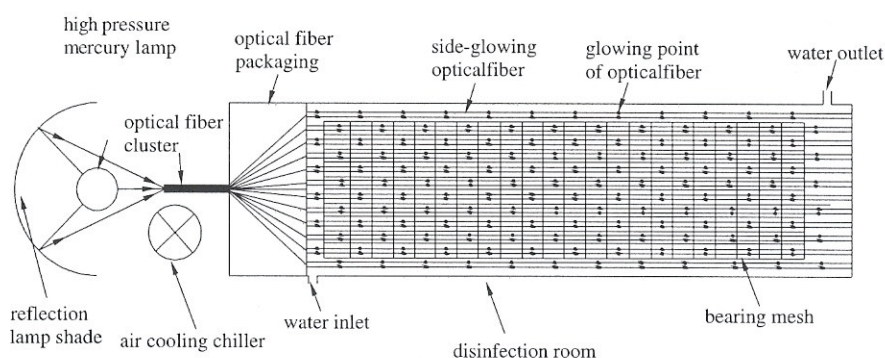


Figure E12 : exemple de dispositif expérimental équipé de fibres optiques (Lu et al., 2008)

L'étude présentée par Lu *et al.*, montre que l'efficacité de l'inactivation de *E. coli* est fonction du nombre de fibres utilisées (figure E13).

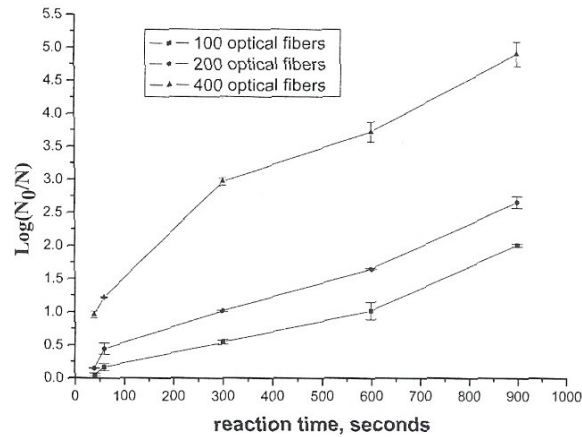


Figure E13 : Courbes d'inactivation de *E. coli* par exposition aux UV en fonction du temps d'irradiation et du nombre de fibres optiques utilisées (Lu *et al.*, 2008).

Plus intéressante est la partie de l'étude consacrée à l'effet de la turbidité, du fer et des acides humiques (figure E14). L'étude n'effectue cependant aucune comparaison avec un réacteur classique.

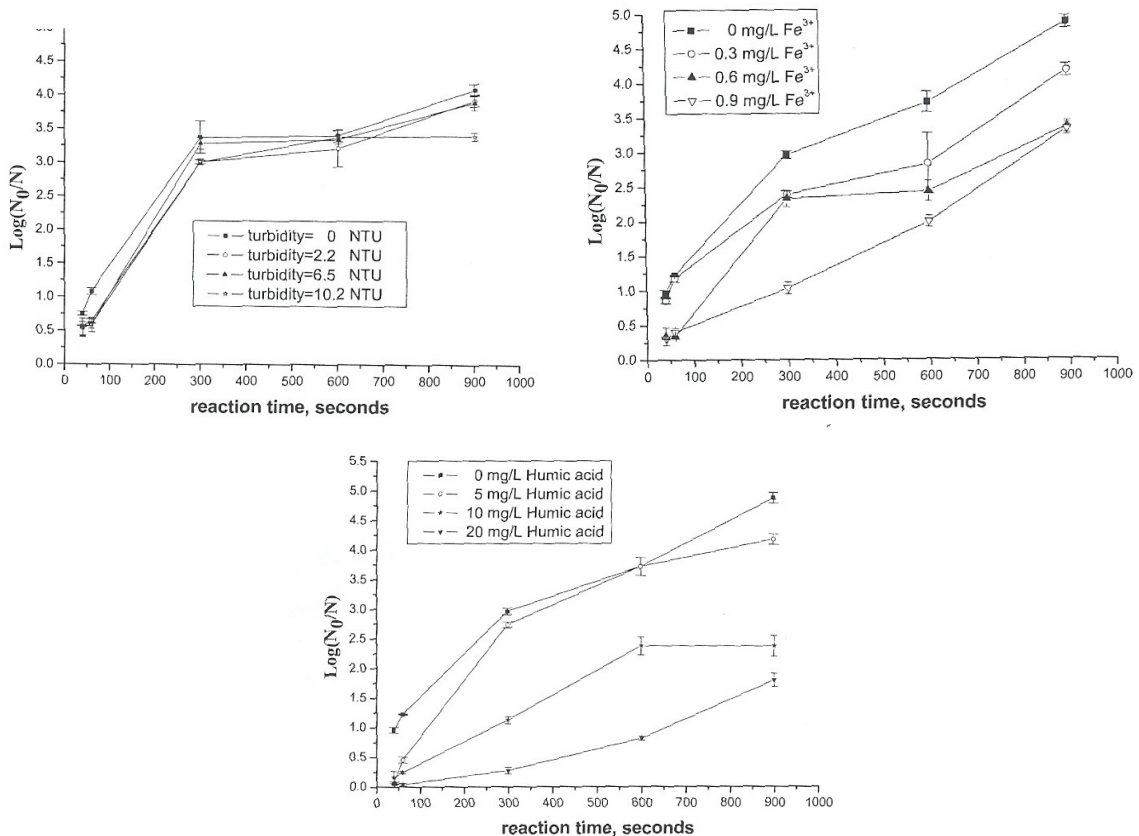


Figure E14 : Courbes d'inactivation de *E. coli* par exposition aux UV en fonction du temps d'irradiation et de la turbidité de l'eau (à gauche), de la présence de fer dissous (au centre) et de la présence d'acides humiques (à droite).

2.2 système HOD®

Cette technique utilise des lampes UV moyenne pression haute intensité, qui sont placées à l'extérieur du réacteur (figure E15). Le réacteur est constitué par un tube de quartz muni d'une ou deux lentilles selon que le dispositif comporte une ou deux lampes. Le rayonnement UV est, pour partie, réfléchi vers la chambre d'irradiation par l'intermédiaire d'un miroir. Ce dispositif permet, selon le constructeur, d'optimiser la répartition de la dose d'irradiation dans le réacteur.

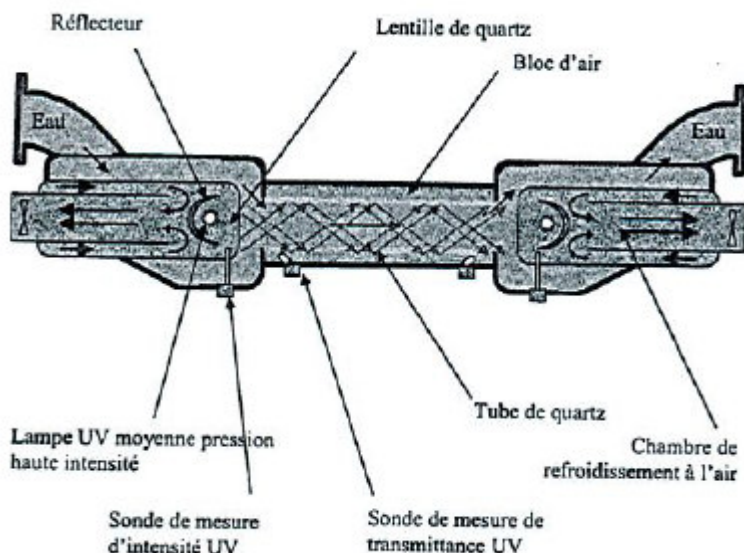


Figure E15 : Schéma de présentation du système HOD

Les lentilles sont recouvertes, côté lampe, d'une gaine absorbante permettant d'atténuer fortement les radiations de longueurs d'ondes inférieures à 240 nm et ainsi de réduire très sensiblement les risques de formation de sous-produits indésirables.

Les essais réalisés à l'aide d'appareils commerciaux montrent une bonne efficacité de désinfection avec des doses voisines de 400 J/m² (tableau E1).

Tableau E1 : Bilan récapitulatif des résultats d'inactivation obtenus sur les micro-organismes cible (Colas et al., 2008)

Micro-organismes	Transmittance UV à $\lambda=254$ nm (%)	DRE (J/m ²)	Concentration moyenne (4 réplicas par série) (unité log – log N)		Abattement log observé	
			Entrée réacteur	Sortie réacteur	moyenne	Ecart type
Phages MS2	94,5	480	4,06	1,42	2,6	0,1
<i>Enterococcus Faecalis</i>	89,9	400	6,74	0	6,7 minimum	0,7
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	90,1	400	7,32	0	7,3 minimum	0,5
Spores de <i>Clostridium bifermentans</i>	93,3	400	5,70	2,88	2,8	0,6
<i>Escherichia coli</i>	93,1	400	7,56	0	7,6 minimum	0,1
<i>Salmonella sp.</i>	91,4	400	> 8,04	< 0,48	7,6 minimum	0,1
Spores de <i>Bacillus subtilis</i>	90,6	400	3,25	1,30	2,0	0,3

Pour ce qui concerne les oocystes de *Cryptosporidium*, les abattements obtenus sont de l'ordre de 5 log. Pour les virus (phages MS2) les abattements sont plus faibles et restent entre 2 et 3 log pour des DRE de 480 J/m².

La formation de nitrites a aussi été étudiée. La figure E16 montre que des traces de nitrites sont mesurées dans des eaux relativement pauvres en nitrates (entre 5 et 10 mg/L de NO₃⁻)

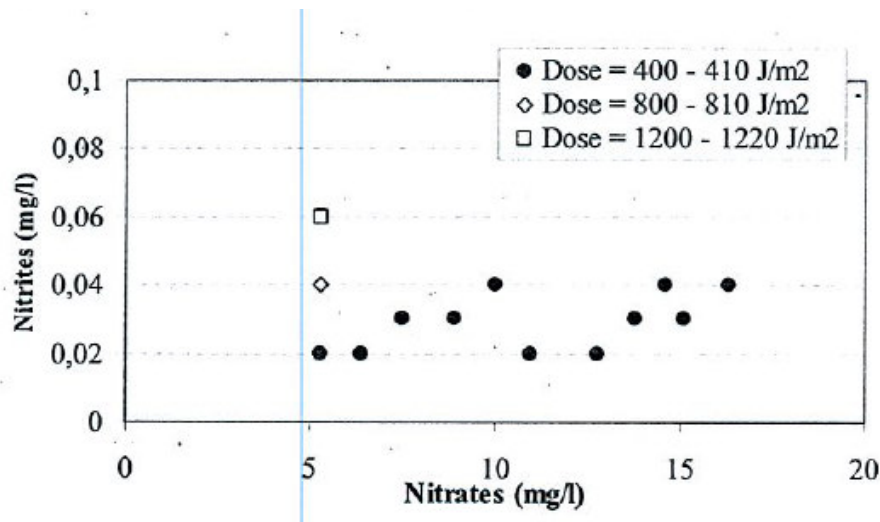


Figure E16: Évolution de la production de nitrites suivant les teneurs en nitrates de l'affluent (Colas et al., 2008)

Bibliographie annexe E

- Close J., Ip J. & Lam K.H., 2006. Water recycling with PV-powered UV-LED disinfection. *Renewable Energy* 31 (11), 1657-1664.
- Colas F., Renvoise L. & Perot J., 2008. Désinfection des eaux potables par les UV moyenne pression dans un réacteur de conception nouvelle - le HOD™ system. Journées Information Eaux. Poitiers.
- Crawford M.H., Banas M.A., Ross M.P., Duby D.S., Nelson J.S., Boucher R. & Allerman A.A., 2005. Final LRDR Report : Ultraviolet Water Purification Systems for Rural Environments and Mobile Applications. p.
- Hamamoto A., Mori M., Takahashi A., Nakano M., Wakikawa N., Akutagawa M., Ikehara T., Nakaya Y. & Kinouchi Y., 2007. New water disinfection system using UVA light-emitting diodes. *Journal of Applied Microbiology* 103 (6), 2291-2298.
- Harbers G. 2006. Fluid purification system with ultraviolet light emitter. Patent abstracts of Japan.
- Knight D.G., Fraser J. & Sasges M. 2009. Ultraviolet Radiation Light Emitting Diode Device. In *UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE PRE-GRANT PUBLICATION*.
- Levy R.C. 2006. METHOD AND SYSTEM FOR REDUCING MICROBES ON A PORTABLE ELECTRONIC DEVICE. In *PATENT COOPERATION TREATY APPLICATION*.
- Lu X., Ye T., Cao Y., Sun Z., Xiong Q., Tang Z., Xiong Z., Hu J., Jiang Z. & Pan Y., 2008. The roles of the various plasma agents in the inactivation of bacteria. *Journal of Applied Physics* 104 (5).
- Maiden M. 2003. Hand-held ultraviolet water purification system using solid state devices. In *UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE GRANTED PATENT*.
- Maiden M. 2006. Uv led based water purification module for intermittently operable flow-through hydration systems. In *UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE PRE-GRANT PUBLICATION*.
- Mori M., Hamamoto A., Nakano M., Akutagawa M., Takahashi A., Ikehata T. & Kinouchi Y., 2006. Effect of ultraviolet LED on bacteria. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering.
- Mori M., Hamamoto A., Takahashi A., Nakano M., Wakikawa N., Tachibana S., Ikehara T., Nakaya Y., Akutagawa M. & Kinouchi Y., 2007. Development of a new water sterilization device with a 365 nm UV-LED. *Medical and Biological Engineering and Computing* 45 (12), 1237-1241.

- Naunovic Z., Lim S. & Blatchley III E.R., 2008.** Investigation of microbial inactivation efficiency of a UV disinfection system employing an excimer lamp. *Water Research* 42 (19), 4838-4846.
- Reed M.L., Garrett G.A., Sampath A.V., Shen P.H., Collins C.J., Wraback M., Zhang J., Hu X., Deng J., Lunev A., Bilenko Y., Katona T. & Gaska R., 2008.** Spectral Sensing Research for water monitoring applications and frontier science and technology for chemical, biological and radiological defense. In *Progress in high efficiency UV LED research for reagentless bioagent detection and water purification*. Company W.W.S. (ed). p. pp 437-443.
- Schlesser R. & Lemunyon J.M. 10 août 2009.** Liquid sanitization device.
- Soloshenko I.A., Bazhenov V.Y., Khomich V.A., Tsiolko V.V. & Potapchenko N.G., 2006.** Comparative research of efficiency of water decontamination by UV radiation of cold hollow cathode discharge plasma versus that of low- and medium-pressure mercury lamps. *IEEE Transactions on Plasma Science* 34 (4 II), 1365-1369.
- Sosnin E.A., Oppenländer T. & Tarasenko V.F., 2006.** Applications of capacitive and barrier discharge excilamps in photoscience. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 7 (4), 145-163.
- Vilhunen S.H. & Sillanpää M., 2009.** Ultraviolet light emitting diodes and hydrogen peroxide in the photodegradation of aqueous phenol. *Journal of Hazardous Materials* 79, 356-359.