



**HAL**  
open science

# L'eau ionisée : des applications médicales aux applications odontologiques

Rachid Guercif

► **To cite this version:**

Rachid Guercif. L'eau ionisée : des applications médicales aux applications odontologiques. Sciences du Vivant [q-bio]. 2016. hal-01932084

**HAL Id: hal-01932084**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01932084>**

Submitted on 23 Nov 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

ACADÉMIE DE NANCY-METZ  
UNIVERSITÉ DE LORRAINE  
FACULTÉ D'ODONTOLOGIE

ANNÉE 2016

N°9294

**THÈSE**

Pour le

**DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Par

**Rachid GUERCIF**

Né le 04/04/1990 à SAINT-CLAUDE (Jura)

**L'eau ionisée : des applications médicales aux  
applications odontologiques**

Présentée et soutenue publiquement le 14 Novembre 2016

**Examineurs de la thèse :**

Pr. P. AMBROSINI	Professeur des Universités	Président
<u>Dr. M. ENGELS-DEUTSCH</u>	<u>Maître de Conférences</u>	<u>Directeur de thèse</u>
Dr. M. VINCENT	Maître de Conférences associé	Juge
M. J-B. PUISSEGUR	Masseur-kinésithérapeute	Membre Invité

*Par délibération en date du 11 décembre 1972,  
la Faculté de Chirurgie Dentaire a arrêté que  
les opinions émises dans les dissertations  
qui lui seront présentées  
doivent être considérées comme propres à  
leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner  
aucune approbation ni improbation.*

Président : Professeur Pierre **MUTZENHARDT**

Doyen : Professeur Jean-Marc **MARTRETTE**

Vice-Doyens : Pr Pascal **AMBROSINI** – Dr Céline **CLEMENT**

Membres Honoraires : Dr L. **BABEL** – Pr. S. **DURIVAUX** – Pr A. **FONTAINE** – Pr G. **JACQUART** – Pr D. **ROZENCWEIG** - Pr M. **VIVIER** – Pr **ARTIS** -

Doyen Honoraire : Pr J. **VADOT**, Pr J.P. **LOUIS**

Maître de conférences CUM MERITO : Dr C. **ARCHIEN**

<b>Sous-section 56-01</b> Odontologie pédiatrique	Mme Mme M. Mme M. M.	<b>DROZ Dominique</b> JAGER Stéphanie PREVOST Jacques HERNANDEZ Magali LEFAURE Quentin MERCIER Thomas	Maître de Conférences * Maître de Conférences * Maître de Conférences Assistante * Assistant Assistant *
<b>Sous-section 56-02</b> Orthopédie Dento-Faciale	Mme M. Mme Mme	<b>FILLEUL Marie Pierryle</b> EGLOFF Benoît BLAISE Claire LACHAUX Marion	Professeur des Universités * Maître de Conférences * Assistante Assistante
<b>Sous-section 56-03</b> Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie légale	Mme M. Mme Mme	<b>CLEMENT Céline</b> CAMELOT Frédéric LACZNY Emily NASREDDINE Greyce	Maître de Conférences * Assistant * Assistante Assistante
<b>Sous-section 57-01</b> Parodontologie	M. Mme M. M. Mme Mme	<b>AMBROSINI Pascal</b> BISSON Catherine JOSEPH David PENAUD Jacques MAYER-COUPIN Florence PAOLI Nathalie	Professeur des Universités * Maître de Conférences * Maître de Conférences * Maître de Conférences Assistante Assistante *
<b>Sous-section 57-02</b> Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique  Anesthésiologie et Réanimation	Mme M. Mme  M. Mme M.	<b>GUILLET-THIBAUT Julie</b> BRAVETTI Pierre PHULPIN Bérengère  DELAITRE Bruno KICHENBRAND Charlène MASCHINO François	Maître de Conférences * Maître de Conférences Maître de Conférences * Assistant Assistant Assistante * Assistant
<b>Sous-section 57-03</b> Sciences Biologiques (Biochimie, Immunologie, Histologie, Embryologie, génétique, Anatomie pathologique, Bactériologie, Pharmacologie)	M. M.	<b>YASUKAWA Kazutoyo</b> MARTRETTE Jean-Marc	Maître de Conférences * Professeur des Universités *
<b>Sous-section 58-01</b> Odontologie Conservatrice, Endodontie	M. M. M. M. M. Mme M.	<b>MORTIER Éric</b> AMORY Christophe BALHAZARD Rémy ENGELS-DEUTSCH Marc GEVREY Alexis GEBHARD Cécile VINCENT Marin	Maître de Conférences * Maître de Conférences Maître de Conférences * Maître de Conférences Assistant Assistante Maître de conférences Associé
<b>Sous-section 58-02</b> Prothèses (Prothèse conjointe, Prothèse adjointe partielle, Prothèse complète, Prothèse maxillo-faciale)	M. M. Mme  Mme  M. M. M. Mme Mme M.	<b>DE MARCH Pascal</b> SCHOUVER Jacques VAILLANT Anne-Sophie  CORNE Pascale  GILLET Marc HIRTZ Pierre KANNENGIESSER François MOEHREL Bethsabée VUILLAUME Florian	Maître de Conférences Maître de Conférences Maître de Conférences * Maître de conférences Associé * Assistant Assistant * Assistant Assistante* Assistant
<b>Sous-section 58-03</b> Sciences Anatomiques et Physiologiques Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysique, Radiologie	Mme Mme M. M.	<b>STRAZIELLE Catherine</b> MOBY Vanessa (Stutzmann) SALOMON Jean-Pierre HARLE Guillaume	Professeur des Universités * Maître de Conférences * Maître de Conférences Assistant Associé

**Souligné : responsable de la sous-section** \* temps plein

Mis à jour le 01.09.2016

**À NOTRE PRESIDENT DE THESE,**

**Monsieur le Professeur Pascal AMBROSINI**

*Docteur en Chirurgie Dentaire*

*Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I*

*Vice doyen au budget et aux affaires hospitalières*

*Habilité à diriger les recherches*

*Professeur des Universités - Praticien Hospitalier*

*Responsable de la sous-section : Parodontologie*

Nous vous remercions pour l'honneur que vous nous faites  
aujourd'hui en acceptant de présider notre jury de thèse.  
Nous sommes très reconnaissant pour la qualité de votre  
enseignement, votre disponibilité et vos encouragements  
tout au long de nos années d'études.

## **À NOTRE JUGE ET DIRECTEUR DE THÈSE**

**Monsieur le Docteur Marc ENGELS-DEUTSCH**

*Docteur en chirurgie dentaire*

*Docteur de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg*

*Maître de Conférences des Universités - Praticien hospitalier, CHU de Nancy*

*Responsable de la sous-section : Odontologie Conservatrice - Endodontie*

Vous nous avez témoigné votre confiance en nous proposant  
ce sujet de travail, nous vous en remercions.  
Nous avons toujours pu compter sur votre disponibilité et vos précieux conseils.  
Nous vous remercions également pour la qualité de votre enseignement  
et votre investissement au sein de l'Université d'odontologie de Nancy.  
Veuillez trouver ici le témoignage de notre profond respect.

**À NOTRE JUGE,**

**Monsieur le Docteur Marin VINCENT**

*Docteur en chirurgie dentaire*

*Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I*

*Maître de Conférences Associé des Universités, Praticien Hospitalier*

*Sous-section : Odontologie conservatrice - Endodontie*

Nous vous remercions de l'honneur  
que vous nous faites de juger notre travail.

Nous sommes infiniment reconnaissant pour votre écoute,  
votre disponibilité, vos encouragements et vos précieux conseils  
pendant nos années de formation.

Soyez assuré de notre considération et de notre profond respect.



**À NOTRE MEMBRE INVITE,**

**Monsieur Jean-Baptiste PUISSEGUR**

Nous tenons à vous remercier très chaleureusement pour votre accueil,  
votre enthousiasme et pour les supports que vous nous avez fournis.

À mes parents, pour l'éducation qu'ils m'ont inculqué, sans vous rien de cela n'aurait été possible.

À mes frères et sœurs, vous m'avez toujours soutenu et encouragé dans mes études. Vous m'avez facilité le chemin en m'évitant de reproduire les mêmes erreurs, cette réussite je vous la dois.

À Elif, ma future femme. Merci pour l'aide précieuse que tu m'as apporté pour la réalisation de ce manuscrit.

À Guillaume et Maud, merci pour votre accueil chaleureux. Je ne saurais te dire à quel point je suis content d'envisager mon avenir professionnel à tes côtés mon Guillaume. Je te remercie Maud pour ta relecture minutieuse et le temps que tu m'as accordé.

À Patricia, merci pour ta bonne humeur au quotidien.

À mes amis,

Amel, Lina, Yala, Yassine et Yahya, heureusement que vous avez été là. Les moments que nous avons partagés ensemble seront gravés dans ma mémoire.

Rapha et Polo, nous avons parcouru tout ce chemin ensemble depuis le lycée. Merci pour tous ces moments passés ensemble.

Jojo, je suis content de te retrouver près de chez moi et que l'on puisse se former ensemble.

Melon et Lulu, les soirées passées tous ensemble ont été mémorables, merci à Lulu pour ses plats gourmets et à Melon pour ses pré-soirées parfaites.

Bastien, à nos conversations forts sympathiques et à notre beau souvenir sur la façon d'obtenir un cœur coulant en pâtisserie.

Thibaud et David, nos soirées raclettes FIFA ont été d'un grand réconfort, merci pour ces moments de détente.

Logan et Toufik, vous êtes toujours opérationnels pour une soirée sympa, nous avons passé de bons moments ensemble.

Ayyoub, j'ai fait ta connaissance trop tardivement mais nous avons quand même pu en profiter. Je suis content de te compter parmi mes amis.

Aline, tu m'as chaperonné depuis mon arrivée à la faculté dentaire, tu as été une super marraine merci.

Quentin et Magali, nous avons partagés d'agréables moments surtout pendant notre stage à brabois.

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction

## LES EAUX IONISEES

### 1. Mécanismes d'action

- 1.1. Principe de base
- 1.2. Potentiel d'hydrogène
- 1.3. Potentiel d'oxydo-réduction
- 1.4. Chlore actif
- 1.5. Mécanismes d'action des eaux ionisées acide et neutre

### 2. Description

- 2.1. Les différentes eaux ionisées
- 2.2. Procédés de fabrication
- 2.3. Réactions chimiques
- 2.4. Biocompatibilité
- 2.5. Toxicité
- 2.6. Corrosion

### 3. Propriétés des eaux ionisées

- 3.1. Consommation de l'eau alcaline réductrice
- 3.2. Stabilité des solutions ionisées
- 3.3. Spectre d'activité des eaux électrolysées acide et neutre
- 3.4. Place des eaux ionisées acide et neutre dans l'éventail des produits désinfectants

## INTERETS DES EAUX IONISEES DANS L'AGRICULTURE

### 1. Spectre d'activité

- 1.1. Contamination des produits agricoles
- 1.2. Action sur les germes retrouvés dans l'agriculture
- 1.3. Comparaison avec l'hypochlorite de sodium

### 2. Utilisation des eaux ionisées dans l'industrie agro-alimentaire

- 2.1. Lavage des produits alimentaires

- 2.2. Réduction des pesticides
- 2.3. Conservation des produits
- 2.4. Qualité de l'eau de consommation
- 2.5. Qualité de l'environnement

## UTILISATION DE L'EAU IONISEE EN MEDECINE

- 1. Désinfection du matériel médical et des locaux
  - 1.1. Les endoscopes
  - 1.2. Hémodialyseurs
  - 1.3. Le matériel radiologique
  - 1.4. Units dentaires
  - 1.5. Les surfaces hospitalières
- 2. Prévention des infections nosocomiales
  - 2.1. Les micro-organismes nosocomiaux
  - 2.2. Bloc opératoire
- 3. Influences des eaux électrolysées sur les maladies chroniques
  - 3.1. Le stress oxydatif
  - 3.2. Le diabète
  - 3.3. L'angiogenèse tumorale
  - 3.4. L'athérosclérose
  - 3.5. La peau
  - 3.6. Acidose métabolique

## APPLICATIONS ODONTOLOGIQUES

- 1. Intérêts de l'eau ionisée en parodontologie
  - 1.1. Généralités
  - 1.2. Action sur la plaque bactérienne et le biofilm
  - 1.3. Intérêts dans le traitement de la gingivite et de la parodontite
- 2. Place de l'eau ionisée en endodontie
  - 2.1. Rôle d'irrigant canalaire
  - 2.2. Action de l'eau ionisée sur la *smear layer* et les débris canaux
  - 2.3. Action des eaux ionisées sur les dents infectées

Conclusion

Références bibliographiques

Table des matières

## Liste des figures

Figure 1 : échelle de pH.....	18
Figure 2 : pourcentage des principales fractions composantes du chlore dissout en fonction du pH .....	19
Figure 3 : électrolyse de l'eau .....	25
Figure 4 : schéma d'un électrolyseur avec diaphragme permettant la synthèse d'eau ionisée .....	26
Figure 5 : schéma d'un électrolyseur sans diaphragme permettant la synthèse d'eau ionisée neutre .....	27
Figure 6 : électrolyseur destiné à un usage domestique .....	28
Figure 7 : principe d'une norme d'évaluation d'un désinfectant.....	37
Figure 8 : action antioxydante de l'eau ionisée alcaline.....	55

## Liste des tableaux

Tableau 1 : réactions chimiques et molécules retrouvées dans les compartiments de l'électrolyseur.....	30
Tableau 2 : caractéristiques des eaux ionisées testées .....	34
Tableau 3 : conditions de stockage des eaux ionisées testées dans des récipients plastiques .....	34
Tableau 4 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance de bactéries pathogènes.....	38
Tableau 5 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des mycobactéries .....	39
Tableau 6 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des moisissures.....	39
Tableau 7 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des champignons .....	40
Tableau 8 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des spores ..	41
Tableau 9 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des virus .....	41
Tableau 10 : les différentes classes de désinfectants et leurs principaux inconvénients.....	43
Tableau 11 : propriétés des désinfectants utilisés pour la désinfection des endoscopes .....	44
Tableau 12 : activité bactéricide de l'eau ionisée acide comparée à d'autres désinfectants sur différentes souches bactériennes.....	45

Tableau 13 : activité antibactérienne de l'eau ionisée acide sur des germes fréquents dans l'agriculture.....	47
Tableau 14 : activité antibactérienne en fonction du temps d'action de différents désinfectants contre <i>Bacillus subtilis</i> et <i>Mycobacterium avium</i> .....	51
Tableau 15 : activité antibactérienne en fonction du temps d'action de différents désinfectants contre des germes isolés cliniquement .....	52
Tableau 16 : action antibactérienne de l'eau ionisée neutre.....	63
Tableau 17 : irrigants utilisés après instrumentation mécanique manuelle .....	65



## Liste des abréviations

<b>ADN</b>	Acide DésoxyriboNucléique
<b>Aq</b>	Aqueux
<b>ARN</b>	Acide RiboNucléique
<b>ATCC</b>	<i>American Type Culture Collection</i>
<b>CDC</b>	<i>Centers for Disease Control and prevention</i>
<b>CFU</b>	<i>Colony Forming Unit</i>
<b>e<sup>-</sup></b>	électron
<b>EAOW</b>	<i>Electrolyzed Oxidized Acidic Water</i>
<b>EN</b>	<i>Europäische Norm</i> (Norme Européenne)
<b>ERAW</b>	<i>Electrolyzed Reduced Alkaline Water</i>
<b>ERK</b>	<i>Extracellular signal-Regulated Kinases</i>
<b>HbA1c</b>	Hémoglobine glyquée
<b>HDL</b>	<i>High Density Lipoprotein</i>
<b>IRM</b>	Imagerie par Résonance Magnétique
<b>LDL</b>	<i>Low Density Lipoprotein</i>
<b>Log</b>	Logarithme
<b>mg/l</b>	milligramme par litre
<b>mV</b>	milliVolt
<b>NF</b>	Norme Française
<b>ng/ml</b>	nanogramme par millilitre
<b>nm</b>	nanomètre
<b>OPA</b>	Ortho-PhthalAldehyde
<b>Ox</b>	Oxydant
<b>ppm</b>	<i>part per million</i> (partie par million)
<b>Réd</b>	Réducteur
<b>SARM</b>	<i>Staphylococcus Aureus</i> Résistant à la Méthicilline
<b>SERM</b>	<i>Staphylococcus Epidermidis</i> Résistant à la Méthicilline
<b>VEGF</b>	Vascular Endothelial Growth Factor (Facteur de croissance de l'endothélium vasculaire)
<b>VIH</b>	Virus de l'Immunodéficience Humaine
<b>VHB</b>	Virus de l'Hépatite B
<b>POR</b>	Potentiel d'OxydoRéduction
<b>RLO</b>	Radicaux libres oxygénés
<b>EDTA</b>	Ethylène Diamine Tétra-Acétique
<b>PDD</b>	Phosphate De 2,2-Dichlorovinyle
<b>UVA</b>	UltraViolets A
<b>UVB</b>	UltraViolets B
<b>LIPOE</b>	Lésion Inflammatoire Périradiculaire d'Origine Endodontique

## INTRODUCTION

L'eau ionisée est une solution dans un état métastable, ce qui la rend hautement réactive et pratique pour différentes applications. Elle se présente principalement sous deux formes, une eau alcaline propre à la consommation et une eau acide aux propriétés antibactériennes. Cette eau que l'on devrait plutôt appeler eau électrolysée offre une alternative à l'utilisation de produits chimiques désinfectants et présente comme principaux avantages d'être totalement sûre pour l'homme et acceptable pour l'environnement.

L'électro-activation de l'eau passe par un procédé que l'on appelle l'électrolyse, connu depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle. Ce n'est pourtant que dans les années 1950 et sur la base de travaux scientifiques russes que la première machine à électrolyse de l'eau voit le jour au Japon. Cette eau que l'on nomme au Japon *oxidative potential water* a été initialement développée pour l'agriculture. De plus, l'association *Synnhol Medical Science Research* a été créée pour promouvoir cette technologie dans le domaine médical et pour les particuliers. Et depuis 2005, le ministère de la santé du Japon autorise la commercialisation des électrolyseurs pour un usage domestique.

De nos jours, le nombre de machines vendues dans le monde est estimé à 200 000 unités par an, de nombreuses marques commercialisent ce produit. Le coût d'acquisition d'un électrolyseur est variable, pouvant aller de quelques centaines à plusieurs milliers d'euros. En Russie, cette eau est appelée *electrochemically activated water* et dans les années 2000, on dénombrait 20 000 machines en service dans les hôpitaux.

Si les travaux de recherche sur l'eau ionisée sont de plus en plus fréquents, il reste encore de nombreux éléments à élucider quant à sa fabrication et ses modes d'action (Henry et Chambron, 2013). Néanmoins, nous sommes en mesure de réaliser une description des différentes eaux ionisées, de traiter de leurs mécanismes d'action et de leurs propriétés. Nous mettrons en évidence leurs intérêts dans le domaine de l'agriculture, puis nous évoquerons les différents champs d'application des eaux électrolysées en commençant par leurs applications médicales. Enfin, nous aborderons leurs apports en odontologie et plus précisément en parodontologie et endodontie.

## **LES EAUX IONISEES**

### **1. Mécanismes d'action**

#### **1.1. Principe de base**

Il y a plus de 50 ans, sur la base de recherches russes des années 1920, les scientifiques japonais ont développé une machine permettant l'électrolyse de l'eau (Henry et Chambron, 2013). On appelle cette machine un électrolyseur, elle est composée d'un générateur, d'un compartiment dans lequel sont placées les électrodes et parfois d'une membrane semi-perméable permettant de séparer la cathode et l'anode.

La synthèse de l'eau électrolysée nécessite, comme substrat, de l'eau du réseau à laquelle est ajoutée le plus souvent une faible quantité de sel. Un courant électrique est émis entre les électrodes ce qui entraîne une électro-activation de la solution, les molécules anioniques et cationiques sont réparties respectivement vers l'anode et la cathode. Cette réaction chimique permet d'obtenir des eaux ionisées dans un état métastable. Ce qui signifie un état instable, dont la vitesse de transformation vers la stabilité est très lente, rendant ces eaux hautement réactives (Aider et coll., 2012). Deux solutions sont obtenues, la première issue de l'anode nommée eau acide oxydante et la seconde issue de la cathode appelée eau alcaline réductrice.

#### **1.2. Potentiel d'hydrogène**

##### **1.2.1. Définition**

Le potentiel d'hydrogène (pH) est un paramètre permettant de définir si un milieu est acide, neutre ou basique. La valeur de référence d'un milieu neutre est celle de l'eau pure à 25°C, elle a un pH égal à 7. C'est à dire qu'elle contient la même quantité d'ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  et  $\text{OH}^-$ . Un milieu acide est caractérisé par la présence d'ions oxonium  $\text{H}_3\text{O}^+$  ( $\text{H}^+$ ). Lorsqu'une solution aqueuse contient plus d'ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  que l'eau pure, son pH est alors inférieur à 7. Un milieu basique est pour sa part caractérisé par la présence d'ions hydroxydes  $\text{OH}^-$ . (Bibliothèque virtuelle, 2016)

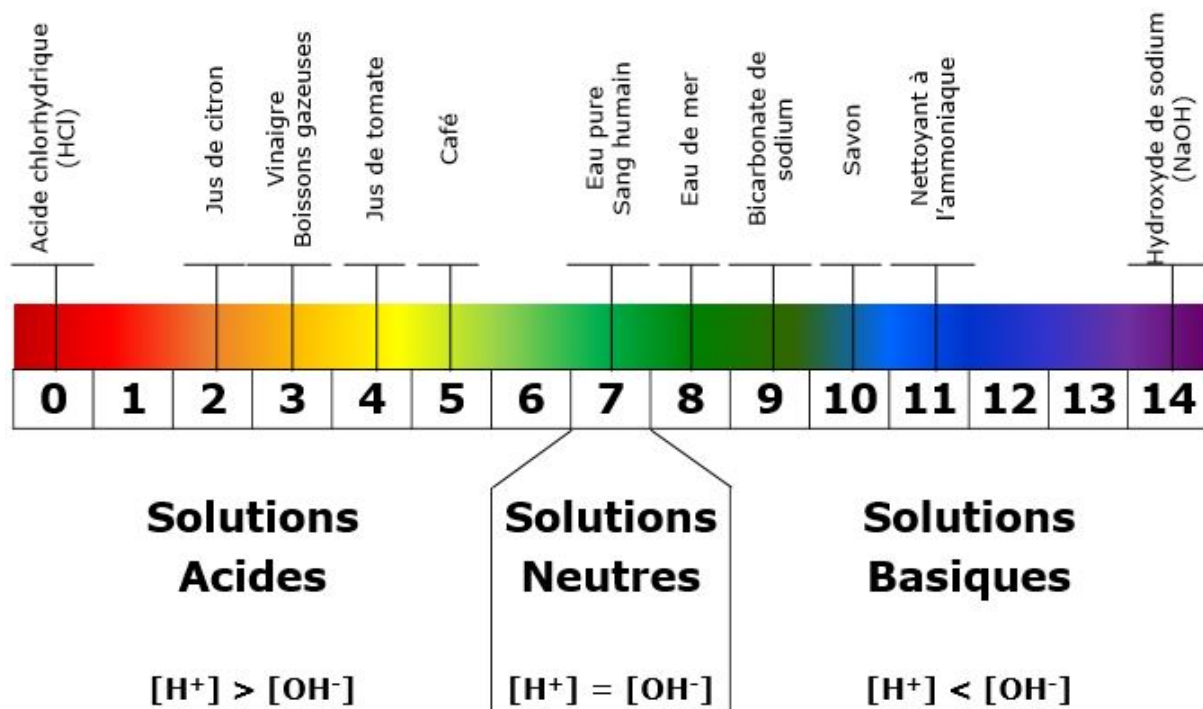


Figure 1 : échelle de pH (Bibliothèque virtuelle, 2016)

Dans toute solution aqueuse se produit une transformation limitée, l'autoprotolyse de l'eau :  $2 \text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ . Cette réaction explique la présence des ions oxonium et hydroxyde dans l'eau pure et permet de relier leurs concentrations par une équation vraie pour toute solution aqueuse :  $[\text{H}_3\text{O}^+].[\text{OH}^-] = 10^{-14} = K_e$ .  $K_e$  désigne le produit ionique de l'eau à 25 °C. Il est toujours égal à  $10^{-14}$  et s'exprime sans unité.

Pour un milieu donné, on peut toujours écrire que  $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$  (ou  $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$ ). Une solution acide aura donc une forte concentration en ions oxonium  $\text{H}_3\text{O}^+$ , et inversement pour un environnement basique (CNRS, 2016).

### 1.2.2. Influence du pH sur l'eau ionisée

Une eau ionisée est généralement définie par son pH, son potentiel d'oxydoréduction (POR) et sa concentration en molécules dérivées du chlore. L'eau électrolysée acide aura généralement un pH inférieur à 3, une eau neutre un pH compris entre 5 et 7 et l'eau basique verra son pH supérieur à 11. Le pH joue un rôle dans les propriétés antibactériennes de l'eau ionisée, en effet le milieu acide constitue un environnement hostile aux bactéries. Cependant, le principal facteur responsable de l'activité bactéricide de cette solution est la concentration en chlore actif (Nisola et coll., 2011).

La prédominance des principaux dérivés du chlore varie en fonction du pH, l'équilibre suivant est fonction du pH :  $\text{Cl}_2 (\text{aq}) \rightleftharpoons \text{HClO} \rightleftharpoons \text{ClO}^-$ .

Les réactions suivantes sont observées :

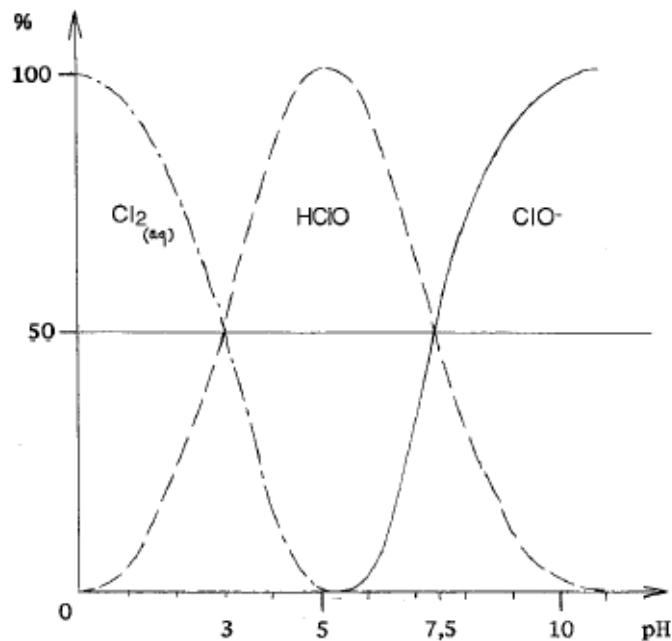
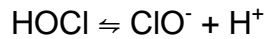
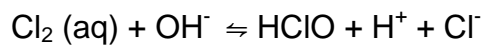


Figure 2 : pourcentage des principales fractions composantes du chlore dissout en fonction du pH (Nagamatsu et coll., 2002)

Lorsque le pH est inférieur à 4,1 le dichlore ( $\text{Cl}_2$ ) est la molécule dérivée du chlore qui prédomine dans la solution ionisée. Quand le pH est compris entre 4,1 et 7,5 l'acide hypochloreux ( $\text{HClO}$ ) est majoritaire. Au-delà d'un pH de 7,5 on retrouve principalement l'ion hypochlorite ( $\text{ClO}^-$ ) (Nisola et coll., 2011).  $\text{HClO}$  possède une action antibactérienne supérieure à celle du  $\text{Cl}_2 (\text{aq})$  et de  $\text{ClO}^-$ . Quand le pH de l'eau ionisée est à 7,  $\text{HClO}$  représente 70% du chlore actif, si le pH augmente à 8, il y aura alors une perte de 20 à 30% de  $\text{HClO}$  au profit de  $\text{ClO}^-$ . Le pH affecte directement la concentration des dérivés du chlore et donc indirectement le pouvoir antibactérien d'une solution ionisée (Nagamatsu et coll., 2002).

Par ailleurs, une eau ionisée qui a un pH neutre sera plus stable et moins corrosive qu'une eau ionisée très acide. Le pH joue également un rôle dans la stabilité des différentes eaux ionisées. De plus, l'eau neutre contient majoritairement des

molécules HClO qui sont plus stables que les autres dérivés du chlore (Waters et Hung, 2014). C'est pourquoi, l'eau électrolysée neutre à pH 6 a été proposée pour optimiser la concentration de HClO dans la solution afin d'obtenir en théorie un meilleur pouvoir désinfectant (Rossi-Fedele et coll., 2011).

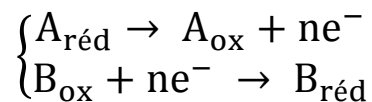
### 1.3. Potentiel d'oxydo-réduction

#### 1.3.1. Définition

Un système chimique S (substance ou groupe de substances) susceptible d'exister sous deux formes, l'une réduite  $S_{\text{réd}}$ , l'autre oxydée  $S_{\text{ox}}$  et différant par  $n$  électrons est dit système d'oxydoréduction, en abrégé système rédox.



Plus un système est oxydant, c'est-à-dire apte à se réduire en captant des électrons, plus son potentiel d'oxydoréduction est élevé. Et inversement, plus il est réducteur, plus il a tendance à céder des électrons et plus son potentiel rédox est bas. Il y a ainsi oxydoréduction lorsque l'oxydation d'un système A est couplée à la réduction d'un système B :



Le potentiel d'oxydoréduction est une grandeur qui mesure le pouvoir oxydant ou réducteur d'un système rédox. La formule de Nernst permet de connaître la valeur du potentiel redox d'un couple d'oxydoréduction dans des conditions données, dès lors que le potentiel standard de ce couple est connu.

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \times \ln \frac{[S_{\text{ox}}]}{[S_{\text{réd}}]}$$

$E_0$  : potentiel standard ;

R : constante des gaz parfaits =  $8,315 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$  ;

T : température absolue, en Kelvin ;

n : nombre d'électrons échangés ;

F : constante de Faraday =  $96\,485 \text{ C.mol}^{-1}$ .

Les valeurs de S entre les crochets correspondent aux activités du système d'oxydoréduction, sous forme oxydées et réduites, qui se confondent avec les concentrations en solution diluée. Le POR s'exprime en mV, il ne mesure pas directement les concentrations des espèces dissoutes mais reflète le niveau d'activité d'une solution (Heller, 2016). On mesure cette valeur avec des électrodes métalliques, le platine est généralement utilisé pour les solutions très oxydantes contenant des chlorures (Aider et coll., 2012). Si une substance possède une affinité pour les électrons supérieure à celle de l'hydrogène, elle aura un potentiel rédox positif. Inversement, si une substance a une affinité plus faible pour les électrons que celle qui caractérise l'hydrogène, son potentiel rédox sera négatif.

### 1.3.2. Rôle du POR dans l'eau ionisée

Le POR augmente en même temps que la concentration en dérivés chlorés, pour 5 mg/L de chlore dissous le POR avoisine les +1000 mV. Ce qui indique que le chlore dissous dans l'eau ionisée est un puissant agent oxydant qui tend à acquérir des électrons pour se stabiliser (Park et coll., 2004). Néanmoins, l'augmentation du POR n'est pas proportionnelle à l'augmentation de la concentration en espèces oxydantes. Le pouvoir désinfectant de l'eau ionisée est fonction du POR, il y a également une augmentation de ce dernier lors de la diminution du pH (James et coll., 2004).

Lorsque le potentiel redox de la solution est supérieur à +650 mV alors les bactéries sont éliminées plus rapidement (Trevor, 2004). L'eau ionisée neutre est une solution oxydante qui possède un POR proche de +800 mV. Celui de l'eau acide avoisine au maximum les +1200 mV, c'est donc une solution encore plus oxydante et très réactive. Quant à l'eau ionisée alcaline, elle est très réductrice avec un POR proche des -800 à -900 mV (Huang et coll., 2008).

## 1.4. Chlore actif

### 1.4.1. Définition

Le chlore actif ou les dérivés chlorés actifs désignent la concentration en espèces chlorées présentes dans l'eau ionisée et disponibles pour le procédé de désinfection (Chuang et coll., 2013 ; Oomori et coll., 2000). Les principales molécules qui ont un véritable pouvoir désinfectant et que l'on retrouve dans les eaux électrolysées acide et neutre sont HClO, ClO<sup>-</sup> et Cl<sub>2</sub> (aq). HClO est considéré comme le dérivé chloré

possédant la plus grande action bactéricide, son efficacité contre les germes serait 80 à 100 fois supérieure à celle de  $\text{ClO}^-$  (Rossi-Fedele et coll., 2011). Ces différentes molécules sont présentes en quantité variable dans l'eau ionisée.

En présence de matière organique, les espèces chlorées réagissent avec les protéines et acides aminés pour former des N-chloro composés, ce qui inhibe leur action antimicrobienne (Oomori et coll., 2000).

#### 1.4.2. Concentration en chlore actif

La concentration en chlore actif des eaux ionisées est le principal facteur expliquant leurs propriétés antibactériennes. Néanmoins,  $\text{OH}^-$  est impliqué dans le processus de désinfection et plus particulièrement contre les champignons. Il y a plus d'ions  $\text{OH}^-$  dans l'eau ionisée neutre par rapport à l'eau ionisée acide, ce qui expliquerait que l'eau neutre serait plus efficace pour éliminer *Aspergillus flavus* (Xiong et coll., 2010). Les microorganismes sont très sensibles aux dérivés du chlore, à condition que leur concentration dans la solution soit supérieure à 1 mg/l. L'activité bactéricide de l'eau ionisée augmente avec l'augmentation de la concentration en chlore actif (Park et coll., 2004). La concentration en chlore actif d'une eau électrolysée qui sert de désinfectant ne doit pas être inférieure à 35 mg/l car en dessous de cette valeur les propriétés antibactériennes diminuent (Nagamatsu et coll., 2002). Et sur les virus *Influenza*, la concentration nécessaire en chlore actif doit être au moins de 40 mg/l (Tamaki et coll., 2014). Par ailleurs, le pouvoir désinfectant de  $\text{HClO}$  et  $\text{ClO}^-$  serait basé sur la libération d'un atome d'oxygène qui entraînerait des dommages sur le matériel génétique des micro-organismes. Néanmoins, le mécanisme d'action de ces molécules reste inconnu (Kraft, 2008).

### 1.5. Mécanismes d'action des eaux ionisées acide et neutre

#### 1.5.1. Signalisation cellulaire

Le mécanisme d'action de l'eau ionisée comme désinfectant n'est, à ce jour, pas encore parfaitement élucidé. Cependant, il est admis que l'eau ionisée a principalement un impact sur la signalisation et le métabolisme cellulaire bactérien, ce qui entraîne des dégâts structurels et a pour conséquence d'inactiver les bactéries (Osafune et coll., 2006).



L'eau ionisée perturbe la signalisation intracellulaire de *Staphylococcus aureus* en entraînant un relargage massif d'ions potassium ( $K^+$ ) de la membrane vers le cytoplasme. Ce qui provoque une importante augmentation de la perméabilité de la membrane externe et entraîne une importante fuite des protéines du cytoplasme de la bactérie (Ding et coll., 2015).

#### 1.5.2. Modification de la structure cellulaire

Chez *Escherichia coli* la membrane externe est détruite en 4 secondes et la membrane interne subit des dommages au bout de 7 secondes d'action de l'eau ionisée. Par conséquent, cela entraîne des modifications au niveau du cytoplasme et de ses composants (Feliciano et coll., 2012). Au bout de 5 minutes d'action, il est possible d'observer une destruction des plasmides et des dommages sur les molécules d'ADN et d'ARN (Zinkevitch et coll., 2000).

Chez *Candida albicans*, des inclusions dans le cytoplasme sont observables à partir d'une minute d'action et après 5 minutes les parois membranaires sont détruites. Une déformation de la membrane et une fuite des éléments cytoplasmiques ont lieu au bout de 10 minutes (Zeng et coll., 2011).

#### 1.5.3. Perturbation du métabolisme cellulaire

Il a été démontré qu'un POR élevé interfère avec les électrons cellulaires et provoque une interruption du fonctionnement d'enzymes participant au métabolisme bactérien (Liao et coll., 2007 ; Cloete et coll., 2009).

L'eau ionisée perturbe le fonctionnement de déshydrogénases indispensables à la survie des bactéries. L'activité des déshydrogénases est réduite de 44% chez *Candida albicans* et même de 65,84% chez *Staphylococcus aureus* (Ding et coll., 2015).

## **2. Description**

### **2.1. Les différentes eaux ionisées**

#### **2.1.1. Eau acide**

L'eau ionisée acide est une eau oxydée, son pH est compris entre 2 et 9, elle peut donc avoir un pH neutre voire basique, mais elle est le plus souvent très acide. Son potentiel d'oxydoréduction est compris entre +400 et +1200 mV.

Cette eau était initialement utilisée pour l'hygiène personnelle. Actuellement, elle est employée comme produit désinfectant du fait de son large spectre antibactérien.

#### **2.1.2. Eau alcaline**

L'eau alcaline est réductrice avec un pH compris entre 7 et 12, elle a un potentiel d'oxydoréduction de -80 à -900 mV. C'est une eau riche en hydrogène, ce qui lui confère des vertus antioxydantes (Marais, 2000). Depuis sa découverte, cette eau réductrice a été recommandée pour la consommation quotidienne.

#### **2.1.3. Eau neutre**

Plus tardivement, une troisième eau ionisée dite faiblement acide ou neutre a fait son apparition. Elle possède un pH compris entre 5 et 7, et un POR autour de +800 mV. Cette eau présente principalement des avantages en termes de conservation et d'efficacité contre les micro-organismes (Hao et coll., 2012).

Les machines existantes ne sont pas toutes identiques, le paramétrage de celles-ci peut varier et la concentration en chlorure de sodium (NaCl) du substrat également. Il est donc possible de produire de nombreuses eaux ionisées aux caractéristiques et propriétés différentes.

### **2.2. Procédés de fabrication**

#### **2.2.1. L'électrolyseur**

La saumure qui sert de substrat pour l'électrolyse est composée d'eau du réseau dans laquelle est diluée une faible quantité de chlorure de sodium (NaCl) ou d'acide chlorhydrique (HCl).

La machine permettant l'électrolyse du substrat est composée d'un générateur qui permet de délivrer aux électrodes un courant électrique continu. Un compartiment dans lequel sont placées les électrodes anode (+) et cathode (-) et qui sont directement au contact de la solution saline. Dans le cas d'un électrolyseur, l'anode est reliée au pôle positif du générateur (Marais et Williams, 2001).

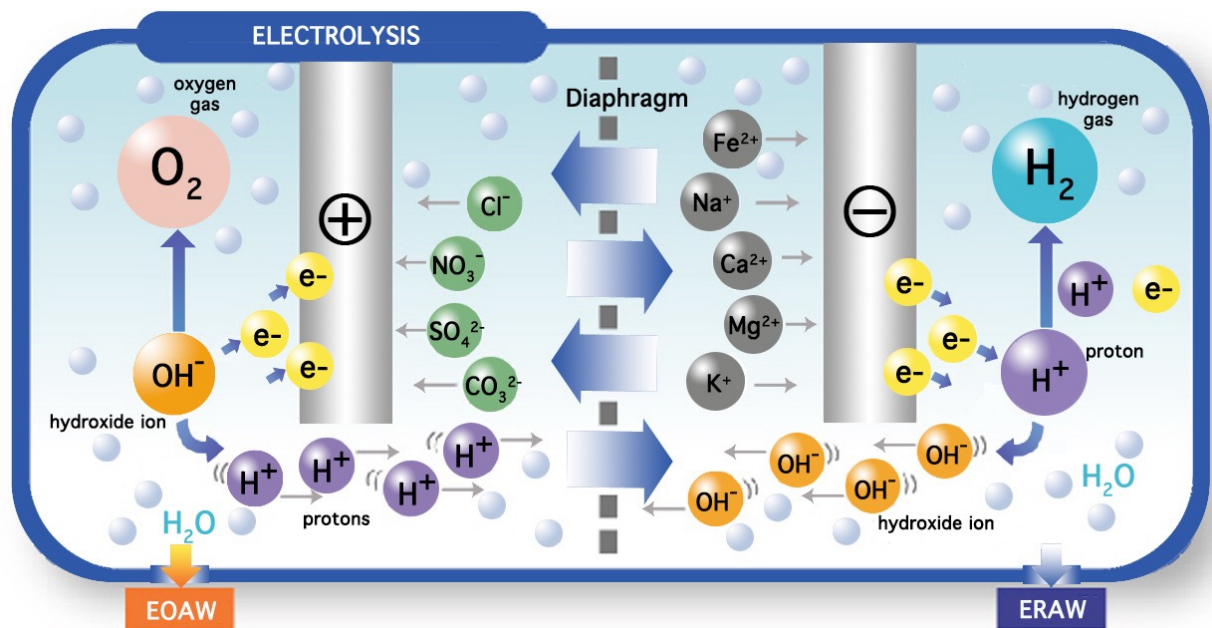


Figure 3 : électrolyse de l'eau (Henry et Chambron, 2013)

Ces électrodes sont constituées de titane avec différents revêtements de surface. L'anode est recouverte soit de platine soit d'une couche d'oxyde d'iridium ou d'oxyde d'iridium et ruthénium (Kraft, 2008). Ces revêtements de surface des électrodes permettent d'augmenter la synthèse de dérivés chlorés. À savoir que l'oxyde de ruthénium montre la plus grande capacité de synthèse de chlore actif par rapport aux autres matériaux fréquemment utilisés (Bergmann et coll., 2008). Quant à la cathode, elle peut être recouverte de pyrocarbone qui est une forme de céramique. Lorsqu'un champ électrique est émis entre les électrodes, les molécules anioniques et cationiques sont réparties respectivement vers l'anode ou la cathode.

### 2.2.2. Dispositif avec membrane semi-perméable

Lorsque l'électrolyseur possède une membrane céramique semi-perméable permettant de séparer les deux électrodes, on obtient deux eaux différentes mais

complémentaires. (Nisola et coll., 2011). En effet, on aura une eau électrolysée acide oxydante et une eau électrolysée alcaline réductrice. Dans ce cas, la solution initialement utilisée est peu concentrée en NaCl, de l'ordre de 0,05 à 1%.

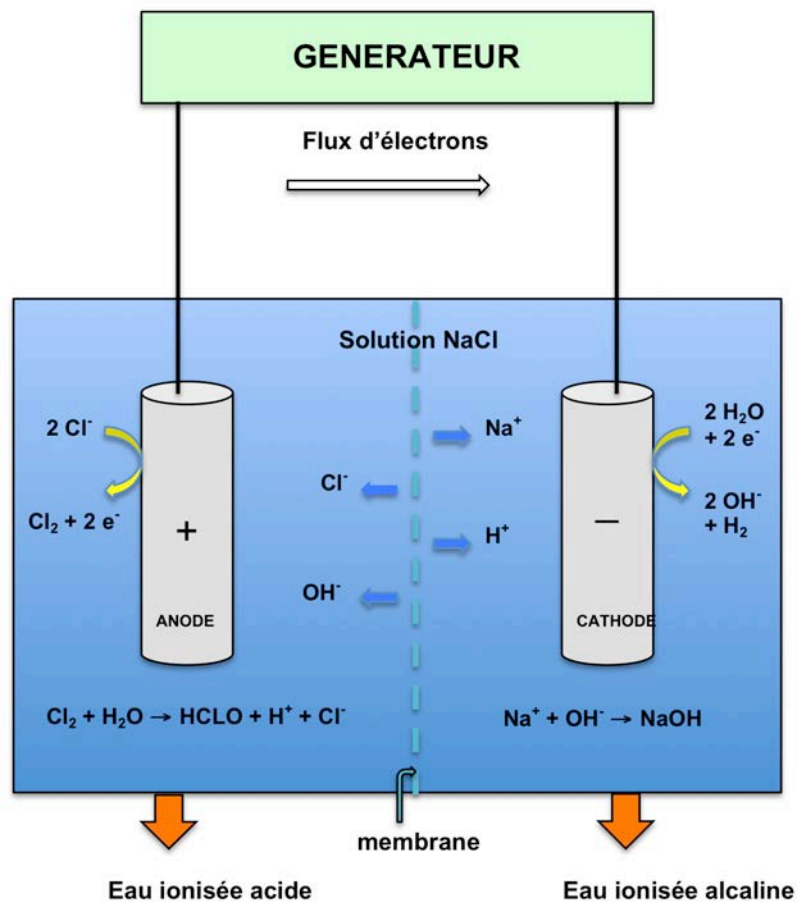


Figure 4 : schéma d'un électrolyseur avec diaphragme permettant la synthèse d'eau ionisée

L'eau ionisée acide a généralement un pH compris entre 2,3 et 2,7, un POR supérieur à +1100mV et une concentration en chlore actif supérieur à 30 ppm. Cette dernière est principalement représentée par Cl<sub>2</sub> (aq). Cette eau est riche en oxygène dissous (Nisola et coll., 2011). Lorsque la solution acide est produite, la machine synthétise obligatoirement la solution basique complémentaire. À savoir une solution dont le pH est compris entre 10 et 11,5, un POR qui va de -80 à -900 mV et une absence de chlore actif. C'est une eau réductrice riche en hydrogène dissous (Huang et coll., 2011).

### 2.2.3. Dispositif sans membrane semi-perméable

Lorsque l'électrolyseur ne possède pas de membrane, une solution plus concentrée en NaCl de l'ordre de 5% est utilisée, afin d'obtenir de l'eau ionisée neutre. Il est également possible d'obtenir cette solution neutre en effectuant un mélange des eaux acide et alcaline (Cui et coll., 2009). L'eau produite possède un pH compris entre 5 et 7, un POR autour de +800 mV et une concentration en chlore actif supérieur à 30 ppm (Nagamatsu et coll., 2002). Il est possible d'obtenir une eau faiblement acide assimilée à de l'eau ionisée neutre en utilisant de l'acide chlorhydrique (HCl à 1 ou 2%) comme substrat et avec une machine sans membrane (Pangloli et Hung, 2011).

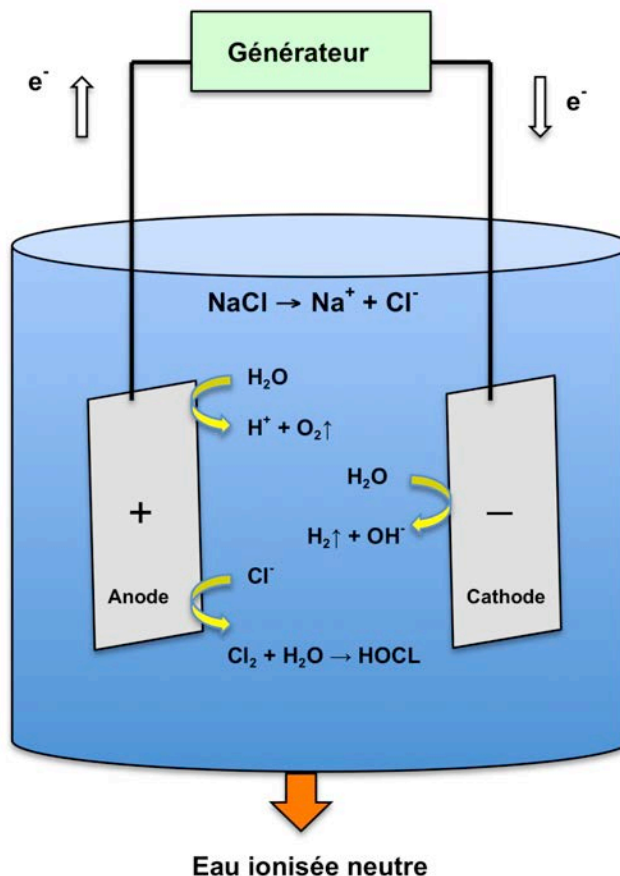


Figure 5 : schéma d'un électrolyseur sans diaphragme permettant la synthèse d'eau ionisée neutre

#### 2.2.4. Electrolyseur destiné aux particuliers

Quand la machine est destinée à un usage domestique, celle-ci possède une membrane semi-perméable. Dans ce cas de figure, il n'y a pas d'ajout de chlorure de sodium dans l'eau qui sert de substrat. L'objectif est de produire une eau alcaline purifiée avec un fort potentiel antioxydant, c'est une eau propre à la consommation et sans chlore actif.

Cette version destinée aux particuliers possède deux filtres différents permettant une ultrafiltration de 10 nm. Ils permettent d'éliminer l'ensemble des impuretés présentes dans l'eau du réseau tout en conservant un taux de minéraux supérieur à 50 mg/l. Le premier filtre est un filtre de charbon actif qui permet de capter le chlore présent dans l'eau, et le second est un filtre céramique qui retient les impuretés (Henry et Chambron, 2013).

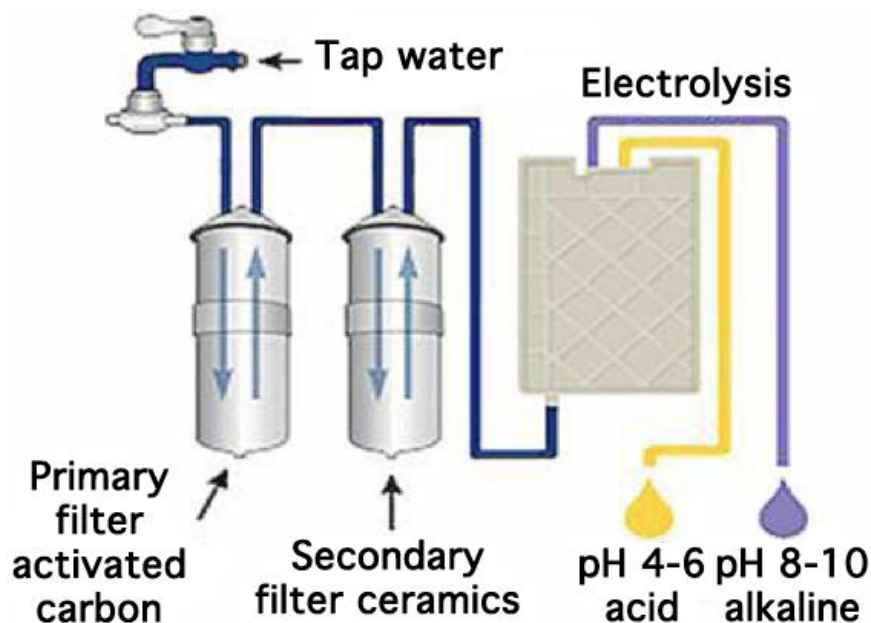


Figure 6 : électrolyseur destiné à un usage domestique (Henry et Chambron, 2013)

#### 2.2.5. Paramètres de l'électrolyseur

L'électrolyse d'une solution saline permet de modifier ses paramètres dont notamment son pH, son potentiel d'oxydoréduction et sa concentration en molécules dérivées du chlore (Nakajima et coll., 2004). Selon les paramètres de la machine utilisée, il est possible d'obtenir différentes eaux acides, neutres et alcalines.

Si on augmente le courant électrique, on entraîne une diminution du POR et de la concentration en chlore actif. Et inversement, en prolongeant la durée de l'électrolyse, on augmente la concentration en dérivés chlorés de la solution (Kiura et coll., 2002).

L'utilisation d'une solution plus concentrée en sel permet également d'augmenter la concentration en chlore actif et la conductivité de l'eau ionisée.

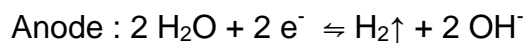
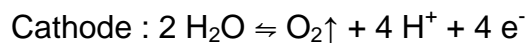
La température de l'eau n'a que peu d'impact sur la concentration en chlore actif de l'eau produite (Hsu, 2005).

## 2.3. Réactions chimiques

### 2.3.1. L'électrolyse

L'électrolyse de l'eau est un procédé connu depuis plus de deux siècles et permettant aux industriels de synthétiser du dihydrogène (H<sub>2</sub>) à la cathode et du dioxygène (O<sub>2</sub>) à l'anode (Kraft, 2008 ; Naegu et coll., 2000).

Les réactions qui ont lieu au niveau des électrodes sont les suivantes :



Néanmoins, la nature physico-chimique précise de l'eau électrolysée n'est pas encore parfaitement connue (Marais et Williams, 2001).

L'eau ionisée est issue de l'électrolyse d'une eau à laquelle une faible quantité de NaCl (0,05 à 5%) ou HCl (1 à 2%) a été ajoutée. Cet apport permet de potentialiser les propriétés de l'eau électrolysée notamment liées à sa concentration en chlore dissous. L'état métastable et les molécules ioniques qui composent ces solutions les rendent particulièrement réactives.

Lorsque le courant électrique traverse la solution, le flux électromagnétique entraîne la migration des ions vers les électrodes et des réactions se produisent au contact de celles-ci. Dans le compartiment anodique a lieu des réactions chimiques d'oxydation avec perte d'électrons alors qu'à la cathode se déroule des réactions de réduction avec gain d'électrons. À l'anode, il y a synthèse de Cl<sub>2</sub>, ce dernier étant dans une solution il sera noté Cl<sub>2</sub> (aq). Secondairement, il existe un équilibre qui est fonction du pH :



À la cathode, il y a principalement la synthèse de dihydrogène (H<sub>2</sub>) et de manière moins importante du peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) et de la soude caustique (NaOH).

Tableau 1 : réactions chimiques et molécules retrouvées dans les compartiments de l'électrolyseur

Compartiment	Anodique	Cathodique
<b>Réactions chimiques</b>	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2\uparrow + 4\text{e}^-$ $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{Cl}_2 (\text{g}) \rightleftharpoons \text{Cl}_2 (\text{aq})$ Puis $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HClO} + \text{H}^+ + \text{Cl}^-$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2\uparrow$ $\text{H}_2\uparrow (\text{g}) \rightleftharpoons \text{H}_2 (\text{aq})$ $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{OH}^-$ $\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$ $2\text{Na} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\uparrow + 2\text{Na}^+ + 2\text{OH}^-$ $\text{Na}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{NaOH}$
<b>Molécules produites</b>	$\text{Cl}_2$ , $\text{HClO}$ , $\text{ClO}^-$ , $\text{ClO}^\cdot$ , $\text{Cl}^\cdot$ , $\text{HO}_2^\cdot$ , $\text{O}_2$ , $\text{HO}^\cdot$ , $\text{O}_3$ , $\text{O}_2^\cdot$ , $^3\text{O}_2$ , $^1\text{O}_2$ , $\text{O}^\cdot$ , $\text{H}_3\text{O}^+$ , $\text{Cl}^\cdot$ , $\text{H}^\cdot$ , $\text{H}_2\text{O}_2$ , $\text{Cl}_2\text{O}$ , $\text{ClO}_2^-$ $\text{HCl}$ , $\text{Cl}_2\text{O}_7$ , $\text{S}_2\text{O}_8^{8-}$ , $\text{C}_2\text{O}_6^{2-}$ , $\text{H}_2\text{SO}_4$ et $\text{HSO}_3\text{Cl}$ .	$\text{OH}^-$ , $\text{H}_3\text{O}_2^-$ , $\text{O}_2^-$ , $\text{HO}^{2-}$ , $\text{H}_2\text{O}_2$ , $\text{H}_2$ , $\text{HO}$ , $\text{H}_2^-$ , $\text{NaOH}$ , $\text{KOH}$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et $\text{Mg}(\text{OH})_2$



### 2.3.2. Molécules actives

La concentration en ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) ne dépend pas de la présence de chlore actif.  $\text{OH}^-$  et  $\text{H}_2\text{O}_2$  ne semblent pas participer de manière significative à l'action antibactérienne des eaux ionisées (Hao et coll., 2012 ; Mokudai et coll., 2012). En effet, il est possible d'affirmer que l'activité antibactérienne des eaux acide et neutre provient principalement de l'action des molécules dérivées du chlore ( $\text{HClO}$ ,  $\text{Cl}_2$  (aq) et  $\text{ClO}^-$ ).

Dans l'eau ionisée neutre,  $\text{HClO}$  peut représenter jusqu'à 93% du chlore actif. Quant à l'eau acide, elle peut contenir jusqu'à 99% de  $\text{Cl}_2$  (aq).

Le faible potentiel d'oxydoréduction de l'eau alcaline contenant du peroxyde d'hydrogène expliquerait que cette eau soit moins efficace contre les bactéries que l'eau issue de l'anode et contenant des dérivés du chlore (Nisola et coll., 2011).

## 2.4. Biocompatibilité

L'ingestion d'eau électrolysée acide pendant 8 semaines chez la souris a permis de démontrer son innocuité pour l'organisme. En effet, les résultats ne révèlent pas de modification du poids des souris, ni de modification des tissus et organes et une absence de symptômes systémiques. Le système digestif ne présente pas d'inflammation, ni aucun dysfonctionnement. Il n'y a également aucune différence notable sur la muqueuse orale ou sur la surface de l'émail dentaire. Cependant, un phénomène d'attrition sur les molaires des souris a été observé dans 40% des cas (Morita et coll., 2011).

De même pour l'eau riche en hydrogène, son ingestion par des rats pendant 28 jours n'a révélé aucune modification systémique visible. Par ailleurs, cette eau n'entraîne pas de mutagénicité, ni de génotoxicité (Saitoh et coll., 2010).

## 2.5. Toxicité

Les eaux acide et neutre possèdent une certaine cytotoxicité, notamment sur les fibroblastes. Cet impact sur les cellules est lié à la présence de chlore dissous, donc à la quantité initiale de  $\text{NaCl}$  présente dans le substrat utilisé dans le procédé d'électrolyse.

Certaines molécules comme HClO semblent traverser la membrane cellulaire et entraîner, après réaction chimique, la libération intracellulaire de dérivés réactifs de l'oxygène comme OH<sup>-</sup>. Malgré cette toxicité, ces solutions peuvent être utilisées *in vivo* et n'entraînent pas d'effets secondaires (Shimada et coll., 2000).

D'autre part, il est intéressant de noter que cette toxicité est nettement moins importante dans l'organisme, du fait de la présence de matières organiques inhibant en partie les ions dérivés du chlore (Mokudai et coll., 2015).

## **2.6. Corrosion**

Les eaux électrolysées acide et neutre provoquent la corrosion des métaux et alliages utilisés en dentisterie. Au bout de sept jours d'immersion, les alliages nobles à prédominance d'or, d'argent et de palladium montrent d'importantes surfaces corrodées notamment par l'eau ionisée acide. Cette corrosion entraîne la formation de cristaux de chlorure d'argent. En ce qui concerne les alliages cobalt chrome, c'est l'eau faiblement acide qui altère le plus leurs surfaces. Des molécules d'oxydes de chrome et de cobalt sont ainsi formées. Les eaux électrolysées n'interfèrent pas avec le titane pur.

L'eau neutre entraîne le moins de corrosion sur l'ensemble de ces alliages (Dong et coll., 2003).

## **3. Propriétés des eaux ionisées**

### **3.1. Consommation de l'eau alcaline réductrice**

#### **3.1.1. Troubles digestifs**

Dans une étude datant de 1994, le professeur Itokawa fut le premier à démontrer l'absence de toxicité de l'eau ionisée alcaline. Puis, en 1999 des tests cliniques en double aveugle ont permis de démontrer l'efficacité de cette eau alcaline dans le traitement des troubles gastro-intestinaux tels que la diarrhée chronique, l'indigestion, les douleurs abdominales et l'acidité gastrique. En effet, les résultats ont mis en évidence une diminution des douleurs abdominales notamment chez les personnes souffrant de diarrhées chroniques (Shirahata et coll., 2012).

La flore bactérienne intestinale est composée entre 96 et 99% de bactéries anaérobies qui se développent favorablement lorsque le POR est compris entre -300

et -400 mV. La consommation d'eau ionisée alcaline dont le POR est négatif serait favorable pour l'équilibre et le maintien de la flore intestinale (Vorobjeva et coll., 2005).

Chez la souris, l'hydrogène contenu dans l'eau alcaline est efficace pour soulager les blessures gastriques induites par des médicaments tel que l'aspirine, son action est dose-dépendante. La consommation d'eau ionisée alcaline permettrait de limiter ces lésions et de retrouver des cellules épithéliales qui sécrètent à nouveau du mucus (Xue et coll., 2014). Cette eau peut influencer favorablement l'immunité locale de l'intestin grêle mais n'influence pas l'immunité systémique (Lee et coll., 2009).

Ce n'est qu'en 2005 que le ministère de la santé japonais a reconnu l'électrolyseur comme machine médicale apportant un bénéfice aux particuliers. En Europe, certains électrolyseurs possèdent la norme CE permettant leur commercialisation. Cependant, ces machines ne sont pas considérées comme matériel médical (Henry et Chambron, 2013).

### 3.1.2. Pouvoir antioxydant

Le stress oxydatif se manifeste principalement dans le corps humain par l'excès des dérivés réactifs de l'oxygène. Les radicaux libres oxygénés (RLO) comme  $O_2^-$ ,  $OH^-$ ,  $NO^-$ ,  $HOO^-$ ,  $^1O_2$ ,  $H_2O_2$  ont une très forte réactivité avec les protéines, les lipides constituant les membranes cellulaires et l'ADN entraînant des dommages de l'appareil génétique. Le corps humain possède des systèmes de défense luttant contre ces molécules, cependant en période de stress ces systèmes peuvent être dépassés.

L'eau alcaline réductrice a la capacité de renforcer des molécules donneuses d'électrons telles que l'acide ascorbique et les polyphénols. Une étude a montré que l'utilisation de cette eau à pH 10 permettrait d'augmenter les effets antioxydants des catéchines (flavanols) contenus dans le thé vert. En effet, cette eau favorise l'hydrolyse des molécules d'épigallocatechine gallate et d'épigallocatechine qui sont les molécules antioxydantes les plus abondantes dans le thé vert. Les produits de ces hydrolyses sont également des molécules antioxydantes, ces réactions permettent d'augmenter leurs propriétés dans le thé vert (Zhao et coll., 2012). Cette capacité à potentialiser l'activité antioxydante de certaines molécules semblerait être

liée à l'augmentation de son produit ionique par rapport à l'eau courante (Hanaoka et coll., 2003).

### 3.2. Stabilité des solutions ionisées

#### 3.2.1. Conditions de stockage

Une des limites de l'eau électrolysée est la modification de ses caractéristiques et de ses propriétés lors de son stockage. Dans une étude de Nagamatsu et coll. en 2002, trois eaux ionisées différentes ont été placées dans 4 conditions de stockages.

Tableau 2 : caractéristiques des eaux ionisées testées (Nagamatsu et coll., 2002)

Eau	pH	ORP en mV	Chlore dissous en ppm
Acide fort	2,4	+1,159	49
Acide faible	6,5	+877	51
Neutre	7	+849	38

L'analyse des paramètres que sont le pH, le POR, la quantité de chlore dissous et l'activité antibactérienne a permis d'établir les limites de conservation de celles-ci.

Tableau 3 : conditions de stockage des eaux ionisées testées dans des récipients plastiques (Nagamatsu et coll., 2002)

Numéro	Couverture du récipient	Fermeture du récipient	Température
1	opaque	fermé	4°C
2	opaque	fermé	23°C
3	transparent	fermé	23°C
4	transparent	ouvert	23°C

#### 3.2.2. Contact avec l'air

Il y a peu de changement de pH ou de l'électro-conductivité au cours du stockage des eaux acides et neutre. Néanmoins, dès 8 jours de stockage dans un récipient ouvert, le pH des eaux électrolysées faiblement acide et neutre augmente d'une

unité, ce qui a pour conséquence de modifier la proportion des différentes espèces chlorées.

Le contact de la solution avec l'air entraîne une diminution du POR pour chacune des eaux électrolysées. Et plus particulièrement un effondrement de cette grandeur pour l'eau ionisée fortement acide, au bout de 10 jours de conservation son POR diminue jusqu'à une valeur de +800mV. Lorsque le récipient est fermé, il n'y a que très peu de variation du pH et du POR.

La concentration en chlore dissous décroît avec le temps. L'eau fortement acide voit sa concentration en chlore dissous décroître le plus rapidement sans couvercle et après 12 jours de stockage il n'y a plus de chlore actif dissous. Cette diminution de la concentration en chlore actif est due à l'évaporation de  $\text{Cl}_2$  (g), ce dernier peut représenter jusqu'à 99% du chlore actif dans l'eau ionisée fortement acide. Cette évaporation s'accroît lors de l'agitation du récipient et la lumière n'influence pas cette évaporation en condition récipient ouvert.

Au-delà de 12 jours de conservation dans un récipient sans couvercle, l'eau fortement acide n'est plus efficace sur *Staphylococcus aureus* (Nagamatsu et coll., 2002).

### 3.2.3. Exposition à la lumière

Aucune modification du pH et du POR n'est observée lorsque les eaux ionisées sont conservées dans un récipient transparent ou opaque. L'exposition des eaux ionisées à la lumière entraîne une baisse de la concentration en chlore dissous par décomposition de  $\text{HClO}$  (Len et coll., 2002). La conservation des eaux ionisées dans un récipient opaque permet de prolonger de quelques jours leur conservation en ralentissant la diminution de la concentration en chlore actif.

### 3.2.4. Température

La conservation des eaux ionisées au frais ( $4^\circ\text{C}$ ) permet de ralentir la diminution de leur concentration en dérivés chlorés et ainsi prolonger leurs propriétés antibactériennes. En effet, l'action bactéricide de l'eau fortement acide est prolongée de 20 jours et celle des eaux ionisées faiblement acide et neutre de 35 jours.

Pour toutes les solutions électrolysées testées, le mode de conservation optimal est le stockage à l'abri de la lumière et de l'air dans un endroit frais à 4°C. L'eau ionisée neutre possède la plus longue durée de conservation, elle peut se conserver 3 mois dans un récipient fermé et au frais tout en préservant ses propriétés désinfectantes. (Nagamatsu et coll., 2002).

### **3.3. Spectre d'activité des eaux électrolysées acide et neutre**

#### **3.3.1. Normes de désinfection**

Les antiseptiques et désinfectants sont des produits efficaces pour inhiber ou éliminer les micro-organismes indésirables. La notion d'antiseptique est limitée aux produits utilisés sur les tissus vivants comme une peau ou une muqueuse lésée. Tandis que les désinfectants sont des produits destinés à un usage sur les surfaces inertes telles que les sols et dispositifs médicaux (Muster, 2008).

En France et en Europe, il existe des normes d'évaluation de l'activité des produits désinfectants. Le principe de ces normes est de mettre en contact le produit testé avec une suspension de micro-organismes pendant un temps et à une température donnés. L'action du désinfectant est neutralisée lorsque le délai de contact est écoulé, puis on dénombre les microorganismes survivants. L'appréciation d'une réduction logarithmique de la population testée permet d'évaluer l'action du désinfectant (CCLIN, 2016).

Le processus de désinfection est très important dans la prévention des infections. Le spectre d'activité du désinfectant doit être le plus large possible : bactéries, virus, champignons, les bacilles tuberculeux et les spores.

## Schéma du principe d'une norme en suspension

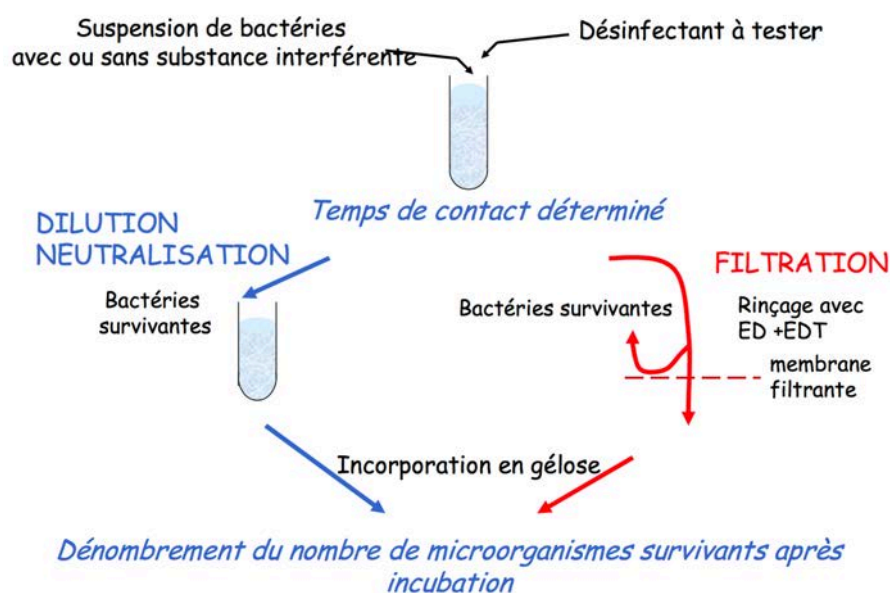


Figure 7 : principe d'une norme d'évaluation d'un désinfectant (CCLIN, 2016)

### 3.3.2. Action antibactérienne

Les normes Afnor NF T 72-150/151 équivalent EN 1040 régissent l'activité bactéricide de base d'un désinfectant. La solution désinfectante est testée sur des suspensions bactériennes de *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 15442 et de *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, des souches additionnelles peuvent être ajoutées. Le temps de contact doit obligatoirement être de 5 minutes et la température de 20°C, des températures et des temps additionnels peuvent être ajoutés. La solution désinfectante testée doit permettre une réduction supérieure de 5 log pour remplir cette norme. L'eau électrolysée neutre a reçu l'agrément de produit à fort pouvoir désinfectant par la *Food and Drug Administration* (FDA) (Yanik et coll., 2015).

L'eau ionisée neutre permet en une minute d'action d'inhiber la croissance de bactéries pathogènes dont *Pseudomonas aeruginosa* et *Staphylococcus aureus* (Tableau 4).

Tableau 4 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance de bactéries pathogènes (Gunaydin et coll., 2014)

Bactéries	Temps de contact
<i>Acinetobacter baumannii</i>	1 minute
<i>Enterococcus faecalis</i>	1 minute
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	1 minute
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1 minute
SARM	1 minute
<i>Escherichia coli</i>	1 minute
ERV	1 minute
<i>Myroides spp.</i>	1 minute
<i>Bacillus subtilis</i>	1 minute
<i>Helicobacter pylori</i>	2 minutes

L'eau ionisée neutre a été testée sur *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, *Escherichia coli* ATCC 1229, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 25619 et *Salmonella typhi* CDC 99. Au bout de 30 secondes d'interaction à 35°C, l'eau neutre a permis une réduction de 8 log bactéries soit une élimination de 99,99% des bactéries (Landa-Solis et coll., 2005). En 2 minutes de temps d'action, l'eau électrolysée permet une réduction de 6 log de *Helicobacter pylori* (Shetty et coll., 1999).

En moins d'une minute d'action, l'eau électrolysée acide permet une réduction de 8 log de *Mycobacterium bovis* (Nakano et coll., 2015). Elle permet également après 5 minutes de contact, une baisse de 5 log des mycobactéries *Mycobacterium tuberculosis* et *Mycobacterium avium* isolés cliniquement (Middleton et coll., 2000). L'eau électrolysée acide permet donc d'inhiber la croissance de mycobactéries pathogènes (Tableau 5).



Tableau 5 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des mycobactéries

<b>Mycobactéries</b>	<b>Temps de contact</b>
<i>Mycobacterium avium</i>	5 minutes
<i>Mycobacterium bovis</i>	1 minute
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	5 minutes
<i>Mycobacterium chelonae</i>	5 minutes
<i>Mycobacterium xenopi</i>	5 minutes
<i>Mycobacterium smegmatis</i>	5 minutes

### 3.3.3. Action fongicide

Pour remplir les normes de base européennes NF EN 1275 concernant les produits désinfectants fongicides, un désinfectant doit permettre une réduction de 4 log des souches *Candida albicans* ATCC 10231 et *Aspergillus niger* ATCC 16404 à 20°C et en 15 minutes d'interaction. L'eau ionisée est efficace pour inhiber la croissance de nombreux champignons et moisissures (Tableaux 6 et 7).

Tableau 6 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des moisissures (Gunaydin et coll., 2014)

<b>Moisissures</b>	<b>Temps de contact</b>
<i>Aspergillus fumigatus</i>	5 minutes
<i>Aspergillus flavus</i>	2 minutes
<i>Aspergillus niger</i>	5 minutes

Tableau 7 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des champignons (Gunaydin et coll., 2014)

Champignons	Temps de contact
<i>Candida albicans</i>	1 minute
<i>Candida tropicalis</i>	1 minute
<i>Candida parapsilosis</i>	1 minute
<i>Candida glabrata</i>	1 minute
<i>Candida krusei</i>	1 minute
<i>Candida lusitanae</i>	1 minute
<i>Trichosporon spp.</i>	1 minute

#### 3.3.4. Action sporicide

En ce qui concerne les produits sporicides, pour remplir les normes européennes NF EN 14347, les produits doivent permettre une réduction de 4 log de *Bacillus subtilis* ATCC 6633 et *Bacillus cereus* ATCC 12826 à 20°C en 30, 60 ou 120 minutes.

Les mycotoxines comme l'aflatoxine B1 sont principalement synthétisées par *Aspergillus flavus*, ces toxines contaminent inévitablement les récoltes agricoles. L'eau ionisée neutre élimine complètement *Aspergillus flavus* en 90 secondes (Xiong et coll., 2010). L'eau électrolysée permet une inactivation complète des spores de *Bacillus subtilis* en 5 minutes (Landa-Solis et coll., 2005). Et une diminution de 5 log des spores de *Clostridium difficile*, ces derniers peuvent être responsables de troubles intestinaux comme la colite pseudo membraneuse (Shetty et coll., 1999). L'eau ionisée remplit parfaitement ce cahier des charges (Tableau 8).

Tableau 8 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des spores (Gunaydin et coll., 2014)

Spores	Temps de contact
<i>Bacillus subtilis</i>	1 minute
<i>Aspergillus flavus</i>	2 minutes
<i>Clostridium difficile</i>	2 minutes

### 3.3.5. Action virucide

La norme NF T 72-180 permet d'établir l'activité virucide de base d'un produit désinfectant. Afin de remplir cette norme, les produits désinfectants doivent permettre une baisse de 4 log des virus Poliovirus 1, Adénovirus 5 et Orthopoxvirus en 15, 30 et 60 minutes de temps de contact.

L'eau ionisée acide est efficace contre les virus de l'hépatite B et du VIH-1, on observe une baisse de 4 log en moins de 5 minutes. Et une diminution de 3 log de l'adénovirus, le virus étant complètement inactivé en moins de 10 minutes (Landa-Solis et coll., 2005). Cette eau permet également en 1 minute d'action de réduire de 5 log les virus *Influenza* H5N1 et H9N2 (Tamaki et coll., 2013).

Tableau 9 : temps d'action de l'eau ionisée pour inhiber la croissance des virus

Virus	Temps de contact
Adénovirus	10 minutes
VIH-1	5 minutes
VHB	5 minutes
<i>Influenza</i>	1 minute

Les produits désinfectants remplissant les normes de base NF EN peuvent être employés dans la désinfection des surfaces, sols et mobiliers.

L'eau ionisée possède un large spectre désinfectant, cependant la démonstration de son efficacité sur ces germes pathogènes ne permet pas de remplir les conditions d'attribution des normes NF EN de base. En effet, en ce qui concerne les souches ATCC des bactéries testées, celles-ci ne correspondent pas précisément aux souches considérées par les normes EN. De plus, il existe des normes d'application NF EN qui autorisent l'utilisation de produits désinfectants dans le domaine médical et paramédical pour la désinfection des dispositifs médicaux et des mains. Il serait intéressant de soumettre les eaux ionisées à l'ensemble de ces normes NF EN de base et d'application afin de promouvoir leurs utilisations en Europe.

### **3.4. Place des eaux ionisées acide et neutre dans l'éventail des produits désinfectants**

#### **3.4.1. Les produits désinfectants**

Les produits désinfectants sont répertoriés en différentes classes :

- La catégorie des oxydants comprend l'acide peracétique, qui est composé de peroxyde d'hydrogène et d'acide acétique. C'est actuellement la solution de choix pour la désinfection à froid. La manipulation de ce produit nécessite un équipement de protection et un système de ventilation adéquat.
- Le dioxyde de chlore est un autre oxydant, il possède les mêmes propriétés que l'acide peracétique, mais c'est un produit très irritant.
- L'orthophthalaldéhyde (OPA) à 0,55% possède une excellente activité antibactérienne et nécessite moins de temps que le glutaraldéhyde pour éliminer les microorganismes. Cette solution tache les protéines en gris, y compris la peau, c'est pourquoi sa manipulation se fait avec précautions (Rutala et Weber, 2001).
- Les alcools sont inflammables, ils ne peuvent donc pas être utilisés en grande quantité. De plus, ils ne sont pas efficaces sur les spores.
- En ce qui concerne les phénols, ils sont particulièrement irritants pour la peau.
- Les ammoniums quaternaires sont des substances tensioactives aux propriétés détergentes et antibactériennes, dont le spectre d'activité est moins important que le glutaraldéhyde. Ce sont également des molécules irritantes

pour la peau et les muqueuses à une concentration supérieure à 0,1% et elles peuvent entraîner des dommages sur le matériel (Verdun-Esquier, 2000).

Tableau 10 : les différentes classes de désinfectants et leurs principaux inconvénients

Classe	Exemple	Toxicité
Alcools	Alcool éthylique à 70%	Aucune
Aldéhydes	Glutaraldéhyde	Très irritant, allergisant
Biguanides	Chlorhexidine	Légèrement irritant
Composés chlorés	Hypochlorite de sodium	Irritant, corrosif
Iodophores	Povidone iodée	Réaction d'hypersensibilité
Dérivés phénoliques	Acide phénique	Très irritant
Ammoniums quaternaires	Chlorure de benzalkonium	Réaction d'hypersensibilité
Agents oxydants	Acide peracétique	Corrosif, explosif
Amines	Alkylamine	Aucune

### 3.4.2. Comparaison de l'eau ionisée avec d'autres produits désinfectants

En dentisterie, ces produits désinfectants sont utilisés sous formes de spray, de lingettes, de bidons pour la désinfection des surfaces et des dispositifs médicaux (ADF, 2013).

Dans cet éventail de produits désinfectants, l'eau électrolysée acide est une solution possédant un large spectre d'activité et avec comme principaux avantages d'être non irritante, non toxique et de nécessiter aucun équipement particulier.

L'alcool, les ammoniums quaternaires, les phénols, le dioxyde de chlore et l'eau ionisée sont inhibés par la présence de matières organiques. Il n'existe donc pas de désinfection efficace sans nettoyage minutieux au préalable (Babb et Bradey, 2001).

Tableau 11 : propriétés des désinfectants utilisés pour la désinfection des endoscopes (Babb et Bradley, 2001)

+ : action forte ; - : action faible ; +/- : action modérée ; 0 : aucune action ; ≈ : action variable.

	Action désinfectante				Stabilité	Inhibition par la matière organique
	Spores	Mycobactéries	Bactéries	Virus		
Glutaraldéhyde	+/-	+/-	+	+	+/-	non
OPA	-	+	+	+	oui	non
Acide peracétique	+	+	+	+	non	non
Alcool	-	+	+	+	oui	oui
Ammoniums quaternaires	-	≈	+/-	+/-	oui	oui
Phénols	0	-	+	+	+/-	oui
Dioxyde chlore	-	+	+	+	non	oui
Eau ionisée	+	+	+	+	non	oui

Ces solutions désinfectantes ont été testées sur un échantillon de  $1,7 \times 10^6$  bactéries pathogènes difficiles à éliminer (Tableau 12). Les bactéries *Serratia marcescens* sont fréquemment isolées dans l'environnement hospitalier et certaines souches sont responsables d'infections nosocomiales (urinaire, septicémie). *Burkholderia cepacia* est une bactérie pouvant entraîner une pneumonie chez les patients immunodéprimés.

La plus efficace des solutions testées pour éliminer ces bactéries résistantes est l'éthanol à 80%, qui s'avère être bactéricide sur toutes ces souches en moins de 10 secondes (Landa-Solis et coll., 2005). L'eau électrolysée s'est montrée plus efficace

que la povidone iodée à 0,02% et que la chlorhexidine à 0,01% (Tanaka et coll., 1996). L'eau ionisée acide pourrait donc être employée comme agent antiseptique.

Tableau 12 : activité bactéricide de l'eau ionisée acide comparée à d'autres désinfectants sur différentes souches bactériennes (Tanaka et coll., 1996)

Bactéries	Désinfectants	Nombre de bactéries retrouvées en CFU/0,1 mL en fonction du temps		
		10s	60s	180s
SASM	Eau ionisée	0	0	0
	Povidone iodée 0,02%	0	0	0
	Ethanol 80%	0	0	0
	Chlorhexidine 0,01%	>500	>500	>500
	Eau distillée	>500	>500	>500
SARM	Eau ionisée	0	0	0
	Povidone iodée 0,02%	15	0	0
	Ethanol 80%	0	0	0
	Chlorhexidine 0,01%	>500	>500	>500
	Eau distillée	>500	>500	>500
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	Eau ionisée	0	0	0
	Povidone iodée 0,02%	0	0	0
	Ethanol 80%	0	0	0
	Chlorhexidine 0,01%	>500	>500	>500
	Eau distillée	>500	>500	>500
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Eau ionisée	0	0	0
	Povidone iodée 0,02%	0	0	0
	Ethanol 80%	0	0	0
	Chlorhexidine 0,01%	>500	>500	>500
	Eau distillée	>500	>500	>500
<i>Escherichia coli</i>	Eau ionisée	0	0	0
	Povidone iodée 0,02%	71	0	0
	Ethanol 80%	0	0	0
	Chlorhexidine 0,01%	>500	1	0
	Eau distillée	>500	>500	>500
<i>Serratia marcescens</i>	Eau ionisée	0	0	0
	Povidone iodée 0,02%	0	0	0
	Ethanol 80%	0	0	0
	Chlorhexidine 0,01%	>500	>500	>500
	Eau distillée	>500	>500	>500
<i>Burkholderia cepacia</i>	Eau ionisée	3	0	0
	Povidone iodée 0,02%	>500	237	0
	Ethanol 80%	0	0	0
	Chlorhexidine 0,01%	>500	>500	>500
	Eau distillée	>500	>500	>500

## INTERETS DES EAUX IONISEES DANS L'AGRICULTURE

### 1. Spectre d'activité

#### 1.1. Contamination des produits agricoles

Les produits agricoles frais ont une microflore épiphyte naturelle à la récolte et ils peuvent être contaminés par l'emballage, lors du transport ou la vente à partir de diverses sources telles que l'environnement ou l'homme (Lee et coll., 2014).

La consommation de produits frais ou faiblement cuits nécessite une action désinfectante afin d'éliminer des bactéries pathogènes telles que *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et *Salmonella spp.* Ces bactéries peuvent entraîner divers troubles de la santé pour l'homme dont notamment des diarrhées, vomissements, douleurs abdominales et parfois même la mort. Au Japon, le Ministère de la Santé a autorisé l'utilisation des eaux ionisées acide et faiblement acide pour décontaminer les produits alimentaires.

#### 1.2. Action sur les germes retrouvés dans l'agriculture

La souche *Escherichia coli* O157 : H7 est connue pour être responsable de diarrhées et colites hémorragiques (Smigic et coll., 2009). En 3 minutes d'action, l'eau acide permet de réduire sous les limites de détection *Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium* et *Listeria monocytogenes* (Park et coll., 2009 ; Kim et coll., 2000). En 2 minutes, l'eau ionisée élimine 8,2 log CFU/ml des bactéries *Salmonella enteritidis* (Zhang et coll., 2011). Les bactéries *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterococcus faecalis* et *Micrococcus luteus* peuvent être responsables de l'altération du lait et rendre impropre sa consommation. Pour une concentration en chlore actif supérieure à 10 mg/l, l'eau neutre élimine en 30 secondes plus de 5 log CFU/ml de ces microorganismes (Jiménez-Pichardo et coll., 2016).

Les spores de *Bacillus subtilis* et *Bacillus cereus* contaminent les récoltes agricoles, leurs toxines peuvent provoquer des intoxications alimentaires. L'augmentation de la durée de contact et de la concentration en chlore actif de l'eau ionisée permet d'améliorer son efficacité sur les spores. En effet, pour une concentration en dérivés chlorés actifs de 120 mg/l, 2 minutes suffisent à l'eau électrolysée pour éliminer



complètement les spores *Bacillus cereus* et réduire de 6 log les spores de *Bacillus subtilis* (Zhang et coll., 2016).

Huang et coll (2008) ont regroupé dans leur étude les germes fréquemment rencontrés dans le domaine de l'agriculture et sur lesquels l'eau ionisée acide est efficace.

Pour une température de 23°C et en moins de 5 minutes, l'eau électrolysée acide permet une réduction de 7 log de la souche *Escherichia coli* O157 : H7, ainsi qu'une réduction de 6 log de *Salmonella enteritidis*. De même pour une température de 23°C, 30 secondes suffisent à l'eau ionisée acide pour complètement inactiver *Pseudomonas aeruginosa*, *Citrobacter freundii*, *Flavobacter sp.*, *Proteus vulgaris*, *Alcaligenes faecalis*, *Aeromonas liquefaciens*, *Campylobacter jejuni* et *Enterococcus faecalis*. Un temps d'action de 10 minutes est nécessaire à l'eau ionisée pour permettre une réduction de 5 log de *Salmonella typhimurium*.

Tableau 13 : activité antibactérienne de l'eau ionisée acide sur des germes fréquents dans l'agriculture (Huang et coll., 2008)

-- : non mesuré ; 0 : inactivation complète du germe

Espèces bactériennes	Population bactérienne survivante après différents temps de contact (log <sub>10</sub> CFU/mL)				
	0 s	30 s	1 min	5 min	10 min
<i>Escherichia coli</i>	8,04	--	--	< 1	0
<i>Salmonella enteritidis</i>	7,76	--	--	< 1	0
<i>Salmonella typhimurium</i>	5,11	--	--	3,46	0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	8,04	0	--	--	--
<i>Citrobacter freundii</i>	7,63	0	--	--	--
<i>Flavobacter sp.</i>	8,12	0	--	--	--
<i>Proteus vulgaris</i>	8,01	0	--	--	--
<i>Alcaligenes faecalis</i>	7,80	0	--	--	--
<i>Aeromonas liquefaciens</i>	7,90	0	--	--	--
<i>Campylobacter jejuni</i>	7,47	0	--	--	--
<i>Enterococcus faecalis</i>	8,23	0	--	--	--

### **1.3. Comparaison avec l'hypochlorite de sodium**

NaClO est un produit désinfectant largement répandu dans le domaine agro-alimentaire.

Les eaux ionisées acides ont une efficacité similaire à l'hypochlorite de sodium sur *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et *Salmonella spp*, à savoir une réduction de 5 log après 60 secondes de contact. Les eaux ionisées permettent de diminuer la concentration en chlore actif des désinfectants utilisés dans l'agriculture (Issa-Zacharia et coll., 2011). L'eau neutre dont la concentration en chlore actif est de 60 mg/l offre également une alternative à l'hypochlorite de sodium à 120 mg/l. Cette eau n'affecte pas la qualité des produits et permet de diviser par 2 la concentration en chlore (Rico et coll., 2007).

## **2. Utilisation des eaux ionisées dans l'industrie agro-alimentaire**

### **2.1. Lavage des produits alimentaires**

Le lavage des fruits et légumes à l'aide d'eau ionisée permet de réduire la présence de micro-organismes comme *Escherichia coli*. Laver 8 secondes les tomates avec l'eau ionisée acide permet de réduire de 5,4 à 6,3 log CFU/g la présence de cette bactérie (Pangloli et Hung, 2011). Cependant, l'efficacité de l'eau électrolysée acide sur les salades est moindre, en 2 minutes d'action elle ne permet qu'une réduction < 1 log CFU/g sur une population initiale de 6,68 log CFU/g (Lindsey et coll., 2009). Pour le lavage des carcasses de volailles, l'utilisation de l'eau ionisée acide est aussi efficace que celle de NaClO (Northcutt et coll., 2007).

L'utilisation combinée d'une solution ionisée alcaline et d'une solution ionisée acide offre de meilleurs résultats que l'utilisation de chacune prise isolément (Hao et coll., 2015). En effet, sur la coriandre fraîche, le rinçage successif pendant 5 minutes à l'eau ionisée alcaline puis à l'eau acide permet l'inactivation complète d'*Escherichia coli*. L'utilisation d'une eau ionisée alcaline à 50°C lors du pré-lavage puis d'une eau ionisée acide à 4°C lors du lavage donne les meilleurs résultats en terme de désinfection (Koseki et coll., 2004).

L'utilisation d'eau ionisée neutre pendant 11 jours sur des feuilles de moutarde n'altère pas leur état de surface, ni la qualité du produit. Néanmoins, pour une

concentration supérieure à 100mg/L de chlore, une phytotoxicité a été observé (Tomás-Callejas et coll., 2010).

## **2.2. Réduction des pesticides**

Les molécules d'acéphates, d'ométhoates et de phosphate de 2,2-dichlorovinyle et de diméthyle (PDD) ont été utilisées comme pesticides dans l'agriculture. L'immersion d'épinards, de choux ou de poireaux fraîchement récoltés pendant 30 minutes dans l'eau ionisée acide permet de réduire de 74% le taux d'acéphate, de 62% le taux d'ométhoate et de 59% la teneur en PDD. Tandis que leur immersion dans l'eau ionisée alcaline permet de réduire la présence d'acéphate de 86%, d'ométhoate de 75% et de PDD de 46% (Hao et coll., 2011).

## **2.3. Conservation des produits**

Sous forme de glace, l'eau ionisée permet de maintenir la qualité des crevettes en limitant leurs altérations bactériennes et enzymatiques. En effet, l'eau acide inhibe la croissance bactérienne et ralentit l'action d'enzymes comme la cathepsine B et la polyphénol oxydase qui diminuent la qualité des crevettes lors de leur conservation (Wang et coll., 2014).

## **2.4. Qualité de l'eau de consommation**

L'eau électrolysée neutre a été utilisée en faible concentration [3%] pour décontaminer l'eau de consommation des animaux. Après 3 mois de consommation de cette eau, les brebis produisent plus de lait et celui-ci est plus riche en protéines et en matières grasses. On observe également une diminution de la croissance d'*Escherichia coli* dans l'eau de boisson, ce qui permet de diminuer les produits chimiques utilisés à cet effet (Bodas et coll., 2013 ; Inagaki et coll., 2011 ; Bügener et coll., 2014).

## **2.5. Qualité de l'environnement**

L'eau ionisée sous forme de spray permet la réduction des micro-organismes dans l'air afin d'améliorer la qualité de l'environnement des élevages de volailles (Hao et coll., 2014). Pour une concentration en chlore de 278-320 mg/l, ce spray permet

d'inactiver 78 à 100% des bactéries présentes sur les surfaces (Guentzel et coll., 2008).

Dans l'industrie laitière, l'eau électrolysée alcaline combinée à l'hydroxyde de sodium permet de nettoyer les surfaces des dépôts minéraux et organiques, puis l'eau électrolysée neutre permet de les désinfecter (Jiménez-Pichardo et coll., 2016).

## UTILISATION DE L'EAU IONISEE EN MEDECINE

### 1. Désinfection du matériel médical et des locaux

#### 1.1. Les endoscopes

Depuis 1963, les solutions de glutaraldéhyde ont été utilisées pour la désinfection de matériel et plus précisément de matériel thermosensible comme les endoscopes. La molécule de glutaraldéhyde est employée pour son large spectre d'activité antibactérienne, cependant ce produit possède plusieurs inconvénients, il est irritant pour la peau, les yeux et les bronches.

Depuis 2003, les risques de transmission de microorganismes lors des procédures d'utilisation d'endoscopes ont été mis en évidence. Les principaux germes incriminés sont *Mycobacterium tuberculosis*, *Mycobacterium avium-intracellulare*, *Helicobacter pylori* et *Pseudomonas aeruginosa*.

Actuellement, la désinfection de ce matériel médical est réalisée à l'aide d'acide peracétique ou d'hypochlorite de sodium à 1%, les dérivés aldéhydiques sont progressivement abandonnés (Belleguic et coll., 2001 ; Gautier, 2010).

L'eau ionisée acide représente une alternative à la désinfection des endoscopes souillés, cette dernière est efficace pour éliminer les germes résistants impliqués dans les infections bronchiques et digestives. De plus, cette eau offre un gain de temps par rapport au glutaraldéhyde puisqu'elle permet de diviser par 4 le temps d'action sur les instruments à désinfecter (Middleton, 2000).

Sept souches de micro-organismes cliniquement isolés sur des endoscopes gastro-intestinaux ont été testées avec différents produits désinfectants (Tableaux 13 et 14). Chaque suspension de bactérie contient initialement  $10^7$  CFU/mL.

Tableau 14 : activité antibactérienne en fonction du temps d'action de différents désinfectants contre *Bacillus subtilis* et *Mycobacterium avium* (Urata et coll., 2003)

Temps de contact (min)	Eau acide fort			Eau ozonée			Chlorhexidine			Glutaraldéhyde		
	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
<i>Bacillus subtilis</i>	>500	3	0	>500	>500	>500	>500	81	52	>500	>500	0
<i>Myco-bactérium avium</i>	>500	0	0	>500	>500	>500	>500	>500	>500	0	0	0

Tableau 15 : activité antibactérienne en fonction du temps d'action de différents désinfectants contre des germes isolés cliniquement (Urata et coll., 2003)

Temps de contact (s)	Eau acide fort			Eau ozonée			Chlorhexidine			Glutaraldéhyde			Eau distillée
	10	60	300	10	60	300	10	60	300	10	60	300	10
<i>Helicobacter pylori</i>	0	0	0	>500	108	88	0	0	0	0	0	0	>500
SARM	0	0	0	0	0	0	>500	>500	>500	0	0	0	>500
<i>Escherichia coli</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	>500
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	>500
<i>Candida albicans</i>	0	0	0	0	0	0	>500	>500	0	0	0	0	>500

Contrairement à l'eau ozonée et à la solution de chlorhexidine à 0,05%, l'eau ionisée acide et la solution de glutaraldéhyde à 2% permettent de complètement éliminer *Bacillus subtilis* et *Mycobactérium avium* en 10 minutes (Urata et coll., 2003).

### 1.2. Les hémodialyseurs

En France, le dialyseur est un dispositif stérile et à usage unique car il expose le patient à un très haut risque infectieux (Jacques, 2005). Néanmoins, Tanaka et coll (2000) ont montré que l'utilisation de l'eau ionisée acide s'avère aussi efficace que les solutions d'acide peracétique à 2% et de formaldéhyde à 3,8% pour éliminer les bactéries présentes dans l'appareil à dialyse. L'eau ionisée n'altère pas le fonctionnement de l'appareil et sa présence n'est plus détectable 10 minutes après son utilisation (Tanaka et coll., 2000).

### 1.3. Le matériel radiologique

Certains équipements radiologiques dont l'IRM et des équipements de diagnostic s'avèrent complexes à désinfecter, l'accès est difficile et les produits ne doivent pas être trop corrosifs. L'eau ionisée neutre sous forme d'aérosol peut considérablement réduire la présence de bactéries dans les salles d'examen. En effet, son utilisation sous cette forme permet une diminution comprise entre 78,99% et 92,5% des bactéries présentes dans l'air et sur les surfaces des équipements radiologiques.

L'emploi de l'eau électrolysée dans la désinfection des locaux et du matériel radiologique permettrait de réduire les contaminations nosocomiales. De plus, cette eau n'entraîne pas de dommage sur le matériel, son emploi est sécurisé pour le personnel, elle est écologiquement acceptable, son action est rapide et son spectre d'activité large est efficace sur les biofilms (Pintaric et coll., 2015).

#### **1.4. Les units dentaires**

Les units dentaires peuvent servir de refuge aux bactéries pathogènes, l'eau, délivrée dans les seringues à air/eau et les pièces à main peut être contaminée par des micro-organismes. La formation de biofilms dans les tubes et conduits d'eau de l'unit dentaire joue un rôle important dans la contamination bactérienne du système d'eau (Walker et coll., 2000). Secondairement, des bactéries pathogènes telles que *Pseudomonas*, *Mycobacterium* et *Legionella* peuvent être retrouvées dans ce biofilm. L'eau du réseau peut contenir des bactéries dites planctoniques, c'est pourquoi il est recommandé d'utiliser dans les units dentaires un système d'eau indépendant et de procéder à une décontamination journalière de l'unit dentaire.

Marais et Brözel (1998) ont utilisé de l'eau ionisée acide pendant 5 semaines dans 13 units dentaires avec système indépendant d'eau. En plus de l'élimination des bactéries présentes dans le système d'eau, les auteurs ont montré que cette solution permettait de supprimer complètement le biofilm stagnant dans les conduits (Marais et Brözel, 1998).

#### **1.5. Les surfaces hospitalières**

Les surfaces au sein des hôpitaux ne sont pas toujours lisses, ce qui rend plus complexe leur décontamination. L'eau ionisée acide est un désinfectant permettant la décontamination des surfaces souillées par SARM et *Acinetobacter baumannii*. Lors de son utilisation sous forme de vapeur, la solution est mieux répartie et elle permet de réduire le risque de transmission de germes nosocomiaux. En effet, son utilisation pendant 10 minutes à 3 mètres de distance de la surface contaminée, puis pendant 30 secondes à 1 mètre de celle-ci permet une réduction de 7 log de SARM et *Acinetobacter baumannii* (Clark et coll., 2006).

## **2. Prévention des infections nosocomiales**

### **2.1. Les micro-organismes nosocomiaux**

Une infection nosocomiale est définie par l'Organisation Mondiale de la Santé comme étant « une infection survenant chez un patient à l'hôpital ou dans un autre établissement de santé et chez qui cette infection n'était ni présente ni en incubation au moment de l'admission ». La décontamination de l'environnement clinique des hôpitaux représente un enjeu majeur dans la prévention des infections nosocomiales.

L'eau électrolysée acide est efficace sur de nombreux micro-organismes que l'on peut retrouver en milieu hospitalier. En effet, en moins de 2 minutes de temps de contact, l'eau acide permet une réduction de 5 log des germes suivants : *Mycobacterium chelonae*, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, SARM, *Candida albicans*, Poliovirus de type 2 et VIH 1 (Selkon et coll., 1999).

Cette eau permet également une élimination rapide et à faible concentration de germes et spores incriminés dans des infections nosocomiales. Les germes SARM et *Pseudomonas aeruginosa* sont supprimés en moins de 10 secondes. Les spores de *Bacillus atrophaeus* et *Clostridium difficile* nécessitent l'emploi d'une concentration plus importante (Robinson et coll., 2010). Par ailleurs, les eaux ionisées acide et neutre ont montré leur efficacité sur les virus VIH, hépatite B, herpes simplex, norovirus et sur les virus *Influenza H5N1* responsables de la grippe aviaire (Tanaka et coll., 2000).

### **2.2. Bloc opératoire**

Au bloc opératoire, l'eau ionisée acide a été testée par les chirurgiens pour le lavage de la cavité péritonéale après rupture de l'appendice chez l'enfant et également pour la désinfection du site chirurgical. En comparaison avec l'eau saline, l'eau électrolysée acide n'a pas permis une meilleure élimination des bactéries présentes dans le liquide abdominal appelé ascite. De plus, cette eau ne permet pas de réduire le temps d'hospitalisation, ni les effets secondaires, comme la fièvre, liés à



l'intervention. Néanmoins, on note une diminution des infections du site opératoire de 20%. Il est donc possible d'employer avec sécurité une eau ionisée pour le lavage péritonéal et la désinfection du site chirurgical (Kubota et coll., 2009 et 2014 ; Inoue et coll., 1997).

### 3. Influences des eaux électrolysées sur les maladies chroniques

#### 3.1. Le stress oxydatif

Le stress oxydatif est connu pour être impliqué dans différents troubles de l'organisme, tels que le diabète, l'hypertension artérielle ou l'athérosclérose. L'eau ionisée alcaline contient des molécules de dihydrogène entre 0,3 et 0,6 mg/l, celles-ci permettraient de piéger les RLO et ainsi protéger l'organisme de leurs effets délétères.

L'eau ionisée réductrice possède un rôle antioxydant et favorise l'action d'autres systèmes antioxydants endogènes comme celui du glutathion. Ce dernier a une fonction de détoxification de l'organisme en permettant l'élimination de polluants comme les métaux lourds (Sato et coll., 2008 ; Tsai et coll., 2009).

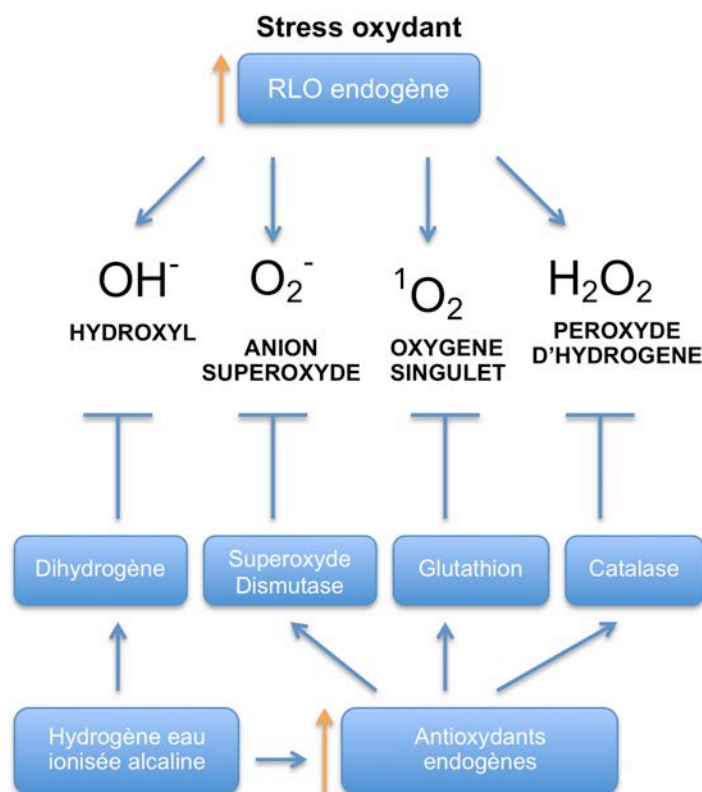


Figure 8 : action antioxydante de l'eau ionisée alcaline (Dixon et coll., 2013)

### **3.2. Le diabète**

Le diabète entraîne un état d'hyperglycémie chronique qui favorise le stress oxydatif et une diminution des défenses immunitaires de l'organisme. La consommation d'eau électrolysée alcaline réductrice pendant six semaines chez la souris souffrant de diabète de type 1 a permis de constater une amélioration de sa glycémie qui était initialement de 2,95 g/l ; elle a été réduite à 1,80 g/l.

Après 29 jours de consommation d'eau ionisée alcaline, la souris diabétique de type 2 a une glycémie inférieure de 41% par rapport à la souris souffrant du même type de diabète mais ne consommant pas cette eau. De plus, son taux d'insuline dans le sang a été multiplié par 3 (Kim et Kim, 2006). Cet effet hypoglycémiant de l'eau ionisée pourrait s'expliquer par une amélioration du fonctionnement des cellules  $\beta$  de Langerhans (Kim et coll., 2007).

Une étude randomisée en double aveugle a été menée sur 30 patients diabétiques de type 2, et 6 patients ayant une tolérance amoindrie au glucose. Les patients ont consommé 900 ml d'eau ionisée alcaline réductrice par jour pendant 8 semaines. L'analyse des résultats a permis de mettre en évidence une diminution des marqueurs systémiques du stress oxydatif comme la molécule d'isoprostane 8 urinaire (baisse de 6,6%) et des LDL oxydées (15,5%). La consommation de cette eau n'a pas permis d'observer une amélioration de la glycémie chez les personnes diabétiques. Néanmoins, chez les patients souffrant d'une altération de la tolérance au sucre, une légère augmentation de la quantité d'insuline dans le sang une heure après l'ingestion de sucre a été observée (Kajiyama et coll., 2008).

### **3.3. L'angiogenèse tumorale**

L'angiogenèse tumorale correspond à la formation de nouveaux vaisseaux sanguins permettant de répondre aux besoins métaboliques de la tumeur.

Les cellules tumorales sont soumises à un fort stress oxydatif, il existe un lien entre l'augmentation de la concentration intracellulaire en peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) et l'augmentation de l'expression du gène *Vascular Endothelial Growth Factor* (VEGF) dans ces cellules. L'expression de ce gène VEGF favorise l'angiogenèse tumorale, l'eau ionisée en piégeant le peroxyde d'hydrogène intracellulaire permettrait une

diminution de sa libération et donc d'atténuer l'expression de ce gène (Ye et coll., 2007).

*In vitro*, cette eau permettrait de prévenir la transformation maligne de cellules qui passe par l'augmentation des RLO intracellulaires (Nishikawa et coll., 2005).

### **3.4. L'athérosclérose**

L'athérosclérose désigne la perte d'élasticité des artères, due à la sclérose provoquée par l'accumulation de corps gras (lipides) au niveau des parois des artères.

Le stress oxydatif exacerbe l'athérosclérose par le biais de molécules comme les LDL oxydées qui vont s'accumuler sur l'endothélium lésé. Les LDL oxydées jouent un rôle dans le développement et la progression de l'athérosclérose.

Chez la souris, la consommation d'eau ionisée alcaline permet de diminuer le niveau de LDL oxydées dans le sang. De plus, chez la souris souffrant d'athérosclérose, six mois de consommation de cette eau ont permis de réduire par deux le volume des lésions sur les vaisseaux sanguins (Ohsawa et coll., 2008).

### **3.5. La peau**

L'application d'eau ionisée acide sur des lésions infectieuses et ulcéreuses de la peau permettrait d'avoir des lésions moins oedématisées et moins rougeâtres (Sekiya et coll., 1997).

Les ultraviolets A (UVA) et B (UVB) sont des rayonnements capables d'endommager la peau et d'induire des lésions cancéreuses. Le rinçage quotidien du visage à l'eau ionisée alcaline permettrait d'atténuer les rides et de lutter contre les effets des UVA qui produisent des RLO (Kato et coll., 2012). Chez la souris souffrant de lésions provoquées par les UVB, la baignade dans l'eau ionisée alcaline pendant 21 jours a permis de sensiblement les réduire (Su yoon et coll., 2011).

### **3.6. Acidose métabolique**

L'acidose métabolique s'explique fréquemment par l'accumulation d'acides endogènes ou par la perte de bicarbonates, elle correspond à une diminution du pH sanguin. L'acidose métabolique peut résulter d'une insuffisance rénale. Lorsqu'une

dialyse est nécessaire pour corriger ce dysfonctionnement, l'utilisation d'eau ionisée alcaline à la place de la solution habituellement employée (l'eau osmosée) permettrait une augmentation plus rapide de la concentration plasmatique en bicarbonate et ainsi diminuer le temps de dialyse (Abol-Enein et coll., 2009).

## **APPLICATIONS ODONTOLOGIQUES**

### **1. Apports de l'eau ionisée en parodontologie**

#### **1.1. Généralités**

Selon la Haute Autorité de Santé : « les maladies parodontales ou parodontopathies peuvent être définies comme des maladies infectieuses multifactorielles. Elles sont caractérisées par des symptômes et signes cliniques qui peuvent inclure une inflammation visible ou non, des saignements gingivaux spontanés ou provoqués d'importance variable, la formation de poches en rapport avec des pertes d'attache et d'os alvéolaire, une mobilité dentaire et peuvent conduire à des pertes de dents » (HAS, 2002).

Le développement des maladies parodontales a été associé à la présence de diverses bactéries et à la formation de biofilms bactériens. Il existe une relation directe entre le niveau d'hygiène bucco-dentaire et l'état parodontal d'un individu. En effet, la perte d'attache gingivale et la présence de poches parodontales est significativement reliée à la présence de plaque dentaire.

L'objectif du traitement parodontal est de prévenir, contrôler la maladie parodontale et de permettre aux tissus parodontaux lésés de se régénérer. Les principaux moyens thérapeutiques disponibles sont les traitements non chirurgicaux (détartrage, surfaçage), et les traitements chirurgicaux (lambeaux, chirurgie muco-gingivale).

Dans tous les cas, l'éducation à l'hygiène bucco-dentaire est une étape essentielle du traitement (HAS, 2002). L'hygiène bucco-dentaire est réalisée par le biais de méthodes mécaniques telles que le brossage des dents, l'utilisation de fil dentaire et des brossettes interdentaires. Ces méthodes ne sont pas toujours simples à mettre en œuvre. Afin d'améliorer l'hygiène buccale, les produits complémentaires comme les bains de bouche aux propriétés antibactériennes et anti-inflammatoires sont fréquemment employés (Gunsolley, 2010).

#### **1.2. Action antibactérienne**

Les eaux ionisées acide et neutre ont été testées sur un nombre important de bactéries impliquées dans les maladies gingivales et parodontales. Ces eaux ionisées ont une action bactériostatique sur les bactéries suivantes : *Streptococcus*

*mutans*, *Streptococcus sobrinus*, *Streptococcus mitis*, *Streptococcus salivarius*, *Streptococcus sanguis*, *Actinomyces viscosus*, *Actinomyces naeslundii*, *Fusobacterium nucleatum*, *Porphyromonas gingivalis*, *Prevotella nigrescens*, *Prevotella loeschii*, *Prevotella melaninogenica* et *Aggregatibacter actinomycetemcomitans*.

La chlorhexidine à 0,20% possède également une action bactériostatique sur *Streptococcus salivarius*, *Actinomyces naeslundii* et *Fusobacterium nucleatum*, cependant, elle n'empêche pas la croissance des autres bactéries testées (Shimada et coll., 2000).

L'eau ionisée neutre possède une action bactéricide sur *Candida albicans* et *Streptococcus mutans*. Lorsque cette eau est enrichie en microbulles d'un diamètre de l'ordre de 50 µm, elle permet d'éliminer complètement les biofilms formés par ces bactéries (Ozaki et coll., 2012).

L'eau ionisée alcaline réductrice possède également une action bactéricide en moins de 15 secondes d'interaction sur *Aggregatibacter actinomycetemcomitans* et *Porphyromonas gingivalis*. Cette dernière fait partie des principales bactéries parodontopathogènes du complexe rouge de Socransky (Okajima et coll., 2011).

D'autre part, en ce qui concerne les eaux ionisées acide et neutre, elles ont une cytotoxicité sur les cellules épithéliales qui est la même que la chlorhexidine (Ito et coll., 1996).

### **1.3. Intérêts dans le traitement de la gingivite et de la parodontite**

Les bains de bouche actuellement utilisés sur une muqueuse lésée ont plusieurs inconvénients, un mauvais goût, un risque de coloration dentaire, des irritations, voire même des douleurs.

L'eau électrolysée acide permet d'éliminer la plaque bactérienne en cours de formation sur les surfaces dentaires. Cette solution a le même potentiel d'inhibition de la plaque bactérienne que la chlorhexidine à 0,20%. Son utilisation sous forme de bain de bouche (30 ml), deux fois par jour pendant 7 jours permet de diviser par 4 la formation de plaque dentaire mature (Ito et coll., 1996). Cependant, l'action de l'eau électrolysée peut être contrarié par les protéines salivaires, c'est pourquoi la concentration en chlore actif doit être suffisamment importante.

La consommation d'eau alcaline réductrice pendant 4 semaines chez le rat souffrant d'une parodontite a permis de limiter la progression de la maladie en diminuant le stress oxydatif gingival. En effet, Tomofuji et coll (2014) ont observé une diminution de l'inflammation locale et une diminution de la perte d'attache épithéliale (Tomofuji et coll., 2014).

Le taux sérique moyen de LDL oxydées chez la souris atteinte de parodontite est de 90,2 ng/ml, alors que chez la souris ne souffrant pas de cette pathologie, ce taux est de 66 ng/ml. La consommation d'eau alcaline chez la souris atteinte de parodontite permet de diminuer la concentration sérique de LDL oxydées. En effet, la consommation de cette eau chez la souris souffrant de parodontite permet de diminuer son taux de LDL oxydées à 74,4 ng/ml (Ekuni et coll., 2012).

Ainsi, l'eau électrolysée neutre pourrait être utilisée comme bains de bouche et la consommation d'eau alcaline pourrait permettre de diminuer le stress oxydatif parodontal.

## **2. Place de l'eau ionisée en endodontie**

### **2.1. Rôle d'irrigant canalaire**

#### **2.1.1. Généralités**

L'étude des données moléculaires montre que plus de 460 espèces (taxons) bactériennes différentes peuvent être retrouvées dans l'endodonte infecté (Siqueira et Rôças, 2009).

Le traitement endodontique combine une action d'élargissement physique de l'endodonte à l'aide d'instruments mécaniques et une action antibactérienne des solutions chimiques d'irrigation (Young et coll., 2007). L'élargissement mécanique favorise l'action de la solution d'irrigation et permet d'éliminer le plus grand nombre de bactéries et les biofilms présents au sein du système canalaire. L'irrigation tout au long du traitement endodontique a pour objectif l'élimination de bactéries, des tissus organiques comme de la *smear layer* et la remontée des débris d'instrumentation. De plus, elle joue un rôle de lubrifiant pour les instruments mécaniques. Le spectre antibactérien de la solution d'irrigation doit être le plus large possible afin d'optimiser son action.

L'hypochlorite de sodium, à une concentration comprise entre 1% et 5,25%, est reconnu pour être l'irrigant de choix lors de la réalisation du nettoyage des canaux radiculaires pendant un traitement endodontique (Young et coll., 2007). En effet, cette solution possède un pouvoir antibactérien important et une activité protéolytique. Contrairement aux autres solutions d'irrigation qui existent, l'hypochlorite de sodium présente la capacité de dissoudre les tissus organiques. Néanmoins, NaClO possède plusieurs inconvénients majeurs dont le fait qu'elle soit irritante et toxique pour les tissus vivants.

Lors de son utilisation en endodontie, la projection de cette solution au-delà du foramen apical peut engendrer des douleurs, un hématome et une nécrose des tissus nécessitant parfois l'hospitalisation du patient (Hülsmann et coll., 2007 ; Gernhardt et coll., 2004).

#### 2.1.2. Efficacité sur les germes endodontiques

L'eau électrolysée possède une action antibactérienne, elle a été testée sur 17 souches bactériennes dont certaines sont fréquemment rencontrées dans les canaux dentaires de dents infectées. Parmi ces 17 souches, 5 d'entre elles sont anaérobies facultatives, 12 sont anaérobies strictes. Après une minute d'interaction de l'eau électrolysée avec ces 17 souches bactériennes, 12 d'entre elles ont été totalement éliminées (Horiba et coll., 1999).

Pour 4 autres souches, l'eau ionisée neutre a permis une importante réduction de leur nombre (5 à 7 log). L'eau ionisée est efficace sur *Candida albicans* puisqu'elle a permis une réduction importante du nombre de germes (5 log). Il est donc possible d'affirmer que l'eau électrolysée est efficace en peu de temps pour éliminer les germes fréquemment rencontrés dans le milieu buccal.



Tableau 16 : action antibactérienne de l'eau ionisée neutre (Horiba et coll., 1999)

Souche en CFU/mL	Suspension Non traitée	Eau distillée	Eau ionisée
<i>Staphylococcus aureus</i>	$4,8 \times 10^6$	$1,7 \times 10^5$	ND
SERM	$4,6 \times 10^6$	$3,1 \times 10^4$	ND
<i>Streptococcus sanguis</i>	$2,3 \times 10^6$	$1,2 \times 10^5$	ND
<i>Peptococcus niger</i>	$7,2 \times 10^6$	$3,1 \times 10^5$	ND
<i>Peptostreptococcus anaerobius</i>	$5,5 \times 10^6$	$2,3 \times 10^5$	ND
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	$3,2 \times 10^7$	$1,8 \times 10^6$	ND
<i>Lactobacillus rogosae</i>	$1,2 \times 10^7$	$4,9 \times 10^5$	ND
<i>Actinomyces israelii</i>	$3,3 \times 10^5$	$1,4 \times 10^4$	ND
<i>Eubacterium lentum</i>	$5,8 \times 10^5$	$2,0 \times 10^4$	ND
<i>Bifidobacterium bifidum</i>	$4,0 \times 10^7$	$2,2 \times 10^6$	ND
<i>Porphyromonas endodontalis</i>	$1,1 \times 10^5$	$3,0 \times 10^4$	ND
<i>Fusobacterium nucleatum</i>	$4,4 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	ND
<i>Streptococcus intermedia</i>	$5,9 \times 10^5$	$1,8 \times 10^6$	< 10
<i>Veillonella parvula</i>	$1,1 \times 10^7$	$9,2 \times 10^5$	<10
<i>Propionibacterium acnes</i>	$1,1 \times 10^7$	$8,2 \times 10^5$	<10
<i>Prevotella melanimogenica</i>	$9,8 \times 10^7$	$5,6 \times 10^6$	< 10
<i>Candida albicans</i>	$3,9 \times 10^6$	$1,4 \times 10^5$	$4,1 \times 10$

### 2.1.3. Comparaison de l'eau électrolysée acide avec NaClO

Action antimicrobienne :

Cette eau a été utilisée dans des conditions d'irrigation endodontique reflétant les conditions cliniques d'utilisation afin d'évaluer sa capacité à se substituer à l'hypochlorite de sodium. Une solution d'hypochlorite de sodium à 3,5% a permis l'élimination complète des bactéries présentes dans le système canalaire représentées principalement par :

- 2 bactéries anaérobies obligatoires (*Prevotella intermedia*, *Porphyromonas gingivalis*).
- 2 bactéries anaérobies facultatives (*Enterococcus faecalis*, *Aggregatibacter actinomycetemcomitans*).

Les eaux ionisées testées ont permis une élimination partielle (50%) des colonies bactériennes (Marais et Williams, 2001). La présence de matière organique inhibe l'action antibactérienne de l'eau ionisée, la rendant inefficace.

Action sur la *smear layer* :

Par ailleurs, l'eau ionisée a été comparée à NaClO en ce qui concerne son efficacité à éliminer la *smear layer* et à remonter les débris dentinaires.

NaClO permet d'évacuer les débris canalaires, mais son manque d'efficacité sur la composante minérale de la *smear layer* ne permet qu'une faible ouverture des canalicules dentinaires.

Lors de l'irrigation finale, l'eau électrolysée permet une excellente élimination de la *smear layer*, les canalicules dentinaires sont ouverts et leur diamètre se retrouve augmenté passant de 2-3  $\mu\text{m}$  à 10-20  $\mu\text{m}$  (Marais, 2000).

L'eau électrolysée comparativement à NaClO, possède une action plus efficace sur la composante minérale de la *smear layer*. Cependant, l'activité antibactérienne de l'eau ionisée est nettement inférieure à celle de l'hypochlorite de sodium.

Au delà du spectre antibactérien, NaClO est efficace sur la composante organique alors que l'eau ionisée est inhibée par la présence de matière organique. Il n'est donc pas possible d'utiliser l'eau électrolysée comme unique irrigant canalaire tout au long du traitement endodontique, ni de substituer l'eau ionisée acide à NaClO.

## 2.2. Action de l'eau ionisée sur la *smear layer* et les débris canalaires

### 2.2.1. Rôle dans l'irrigation finale

L'eau ionisée peut être utilisée lors de l'irrigation finale, elle permet la remontée des débris canalaires mais aussi l'élimination de la *smear layer* superficielle et l'ouverture des canalicules dentinaires sur toute la longueur des canaux (Solovyeva et Dummer, 2000).

Il est admis que l'activation ultrasonique passive de la solution d'irrigation, uniquement après mise en forme complète du système canalaire, permet un meilleur nettoyage de la surface dentinaire intracanaire. En effet, les ultrasons permettraient l'activation de la solution d'hypochlorite de sodium en augmentant sa température, une meilleure distribution de l'irrigant dans les zones canalaires non accessibles à l'instrumentation et le délogement des débris intra canalaires.

Hata et coll (2001) ont évalué sur une eau électrolysée acide, le volume optimal d'irrigation avec une seringue et l'impact de l'activation par ultrasons de cette solution durant le traitement canalaire. Les différentes combinaisons d'irrigation étudiées sont répertoriées dans le tableau ci-dessous (tableau 17).

Tableau 17 : irrigants utilisés après instrumentation mécanique manuelle (Hata et coll., 2001) ++ : très bonne élimination de la *smear layer* et des débris canalaires ; + : bonne élimination de la *smear layer* et des débris canalaires ; - : ne permet pas d'éliminer la *smear layer*, ni les débris canalaires

Groupes	Irrigant lors du cathétérisme	Irrigant final	Volume et durée d'irrigation	Résultats
S1	NaClO 5%	Eau distillée	10, 20 et 30 mL	-
S2	NaClO 5%	Eau ionisée	10, 20 et 30 mL	+
S3	NaClO 5%	EDTA 15%	10, 20 et 30 mL	+
S4	Eau ionisée	Eau ionisée	10, 20 et 30 mL	-
U1	NaClO 5%	Eau distillée	1, 3, 5 min	-
U2	NaClO 5%	Eau ionisée	1, 3, 5 min	+
U3	NaClO 5%	EDTA 15%	1, 3, 5 min	++
U4	Eau ionisée	Eau ionisée	1, 3, 5 min	-

L'irrigation finale avec de l'eau distillée après irrigation avec NaClO et l'irrigation exclusive à l'eau ionisée ont donné les plus mauvais résultats. En effet, la *smear layer* reste abondante sur l'ensemble de la hauteur canalaire et il y a une absence d'ouverture des canalicules dentinaires. Néanmoins, l'irrigation lors du cathétérisme à l'hypochlorite de sodium suivie par une irrigation finale à l'eau ionisée acide permet une bonne élimination de la *smear layer* et des débris dentinaires.

L'activation de l'eau ionisée acide à l'aide d'ultrasons, quelque soit la durée d'action, ne permet pas de réel bénéfice dans l'élimination de la *smear layer*.

Cependant, l'activation ultrasonore de l'EDTA permet d'obtenir de meilleurs résultats. De plus, l'utilisation d'ultrasons sur ces deux solutions permet de nettement améliorer la remontée des débris dans les segments canaux moyens et apicaux (Hata et coll., 2001).

#### 2.2.2. Impact des solutions d'irrigation sur la dentine radiculaire

Les solutions d'irrigation utilisées en endodontie ont un impact sur la dentine, elles entraînent une déminéralisation de celle-ci, visible à travers l'ouverture des canalicules dentinaires et l'exposition de l'ensemble des trames de collagène. Cette action augmente la perméabilité de la dentine et diminue sa micro-dureté, ce qui a pour conséquence de diminuer la résistance de la dent à la fracture (Tartari et coll., 2013).

La solution d'EDTA entraîne la plus importante baisse de dureté de la dentine en comparaison avec NaClO à 2% et à 5%, et de l'eau ionisée acide. C'est notamment au niveau de la dentine proche de la surface externe de la racine (500 à 1000 µm) que l'EDTA entraîne une diminution plus importante de la résistance dentinaire par rapport aux autres solutions. Contrairement à l'EDTA, l'eau électrolysée acide possède principalement une action sur la partie superficielle de la dentine proche de la lumière canalaire (Ghisi et coll., 2014). L'utilisation d'EDTA lors de l'irrigation finale fragilise d'avantage la structure dentinaire que l'utilisation d'eau ionisée acide.

### 2.2.3. Comparaison de l'eau ionisée acide avec l'EDTA

Pour un volume d'irrigation finale de 10 mL, l'eau ionisée acide et l'EDTA montrent une efficacité identique pour nettoyer les parois canalaires, à savoir l'élimination de la *smear layer* et la remontée des débris canalaires.

Ces solutions permettent une excellente élimination de la *smear layer* dans le tiers moyen canalaire. Dans le tiers apical, on observe une *smear layer* résiduelle, mais une ouverture de plus de 50% des canalicules dentinaires.

Pour des volumes de 20 et 30 mL d'irrigation finale, c'est l'EDTA qui élimine le mieux la *smear layer* dans les parties moyennes et apicales des canaux. Pour l'ensemble des volumes d'irrigation testés, l'eau acide permet de faire remonter plus de débris que l'EDTA.

Enfin, l'irrigation canalaire à l'aide de NaClO à 5% et d'eau ionisée acide possède la même efficacité que l'irrigation à l'aide de NaClO à 5% et d'EDTA 15% pour l'élimination de la *smear layer* et la remontée des débris (Hata et coll., 2001).

## 2.3. Action des eaux ionisées sur les dents infectées

### 2.3.1. Action sur *Enterococcus faecalis*

*Enterococcus faecalis* est fréquemment rencontrée dans les infections endodontiques persistantes (Siqueira et Rôças, 2010).

La solution d'irrigation choisie pour conduire le traitement ou la reprise de traitement endodontique doit donc être efficace sur ce germe. La solution NaClO à 4% permet en moins de 3 minutes d'éliminer complètement *Enterococcus faecalis* présent dans l'endodonte, cette solution a donc une action bactéricide sur ce germe. L'eau ionisée neutre a été testée sur *Enterococcus faecalis* dans les mêmes conditions que NaClO, à savoir que le système canalaire n'a pas subi d'élargissement mécanique. Cette eau n'a seulement permis qu'une élimination partielle des bactéries (Rossi-Fedele et coll., 2010). En revanche après élargissement canalaire, NaClO à 1%, l'eau ionisée et la chlorhexidine à 2% ont montré la même efficacité contre *Enterococcus faecalis*. Cela pourrait s'expliquer par la mise en forme canalaire qui élimine les tissus organiques infectés et permettrait donc à l'eau ionisée d'être parfaitement efficace (Giles et coll., 2010).

### 2.3.2. Élimination du biofilm bactérien endodontique

Des études morphologiques de la flore microbienne ont montré que la colonisation bactérienne du système canalaire suit le modèle du biofilm. Le biofilm peut être défini comme une communauté microbienne caractérisée par des cellules fermement fixées à une surface et prises dans une matrice d'exopolymères. Cette matrice extracellulaire confère des caractéristiques uniques aux cellules constitutives du biofilm et est essentielle à l'existence de ce dernier. C'est pourquoi, cette notion de biofilm est fondamentale pour expliquer la survie d'*Enterococcus faecalis* sans apports additionnels de nutriments et malgré les procédures intracanales mises en place pour désinfecter l'endodonte (Siqueira et Rôças, 2010).

Des eaux ionisées acide, neutre et basique ont été testées sur des dents présentant un biofilm bactérien avec *Enterococcus faecalis* comme principale bactérie constitutive. Les eaux acide et neutre contribuent à l'élimination du biofilm bactérien, ces eaux permettent une réduction de 4 log bactéries. Cependant, leur action antibactérienne ne permet pas d'éliminer autant de bactéries que la solution NaClO à 3% qui élimine 5 log bactéries (Gulabivala et coll., 2004).

L'efficacité de l'eau ionisée acide sur le biofilm bactérien composé d'*Enterococcus faecalis* est fonction du temps de contact entre la solution et le biofilm. Il est nécessaire d'observer au minimum 15 minutes de temps d'action pour que l'ensemble des bactéries soit éliminé et que le biofilm résiduel soit composé uniquement de bactéries mortes.

Il n'existe pas de différence significative dans l'élimination d'*Enterococcus faecalis* après 5, 10 ou 15 minutes d'action entre l'eau ionisée acide et NaClO à 5,25% (Chen et coll., 2013). Cette expérience a été réalisée en respectant les protocoles cliniques de préparation instrumentale et d'irrigation.

Dans des conditions cliniques de réalisation du traitement endodontique, l'eau ionisée et NaClO à 2% et à 5% ont été utilisés comme irrigant canalaire sur des dents de chien présentant une LIPOE. L'observation du péri-apex quatre mois après la réalisation du traitement montre un score d'inflammation péri-apical identique lors de l'utilisation de NaClO et de l'eau ionisée (Lopez et coll., 2015).

## CONCLUSION

L'électrolyse d'une eau contenant une faible quantité de NaCl est un procédé permettant de modifier le pH, le potentiel d'oxydoréduction et la concentration en ions dérivés du chlore de cette solution. Lorsque l'électrolyseur synthétise dans le compartiment anodique une eau ionisée acide oxydante, il produit simultanément dans le compartiment cathodique une eau complémentaire appelée eau ionisée alcaline réductrice. Sans membrane semi-perméable, il se produit une eau intermédiaire appelée eau ionisée neutre. L'électrolyseur permet donc d'obtenir des eaux électrolysées acide, neutre et basique possédant des caractéristiques différentes et des domaines d'applications variées.

Les eaux ionisées acide et neutre contiennent du chlore actif et possèdent un potentiel d'oxydoréduction élevé, elles permettent d'élargir l'éventail des produits désinfectants connus. Ces eaux offrent une réelle alternative aux produits désinfectants disponibles sur le marché car elles présentent un large spectre antimicrobien, un faible coût de production, une sécurité d'emploi et sont acceptables pour l'environnement. En comparaison à l'eau ionisée acide, l'eau ionisée neutre présente comme avantages d'être plus stable, de mieux se conserver dans le temps et d'être moins corrosive pour les dispositifs médicaux. L'eau ionisée alcaline réductrice est une eau de consommation quotidienne, elle possède des vertus antioxydantes et permet de soulager les troubles digestifs tels que les douleurs abdominales et les diarrhées chroniques.

Dans le domaine de l'agriculture, les eaux ionisées acide et neutre sont principalement employées pour le lavage des produits alimentaires (fruits, légumes...), ce qui permet d'éliminer les germes présents à leur surface. Elles offrent l'avantage d'être aussi efficace que l'hypochlorite de sodium contre les germes rencontrés dans l'agriculture tout en réduisant par deux la concentration en dérivés chlorés.

Après récolte, l'immersion des fruits et légumes dans les eaux ionisées acide, neutre ou alcaline pendant 30 minutes permet de considérablement réduire l'utilisation des pesticides à leur surface.

En médecine, les eaux électrolysées acide et neutre permettent de désinfecter les dispositifs médicaux thermosensibles comme les endoscopes. Ces eaux ont une efficacité équivalente au glutaraldéhyde et à l'acide peracétique sans nécessiter pour autant de précaution d'emploi. L'utilisation de l'eau ionisée acide sous forme de vapeur permet une désinfection efficace des surfaces hospitalières et réduit ainsi le risque de transmission de pathogènes nosocomiaux.

L'eau électrolysée alcaline réductrice est riche en molécules de dihydrogène qui aident les systèmes de défense de l'organisme à lutter contre le stress oxydatif qui se manifeste principalement par l'excès de radicaux libres oxygénés. Le stress oxydatif est un facteur aggravant impliqué dans de nombreuses maladies chroniques comme le diabète ou l'athérosclérose. La consommation d'eau ionisée alcaline permet d'améliorer le fonctionnement des cellules  $\beta$  de Langerhans et de réduire les marqueurs systémiques du stress oxydatif comme les lipoprotéines de basse densité oxydées impliquées dans l'athérosclérose.

Les eaux ionisées possèdent également des champs d'applications en odontologie.

En parodontologie, l'utilisation d'eau ionisée acide en bains de bouche permet d'améliorer l'élimination de la plaque dentaire en cours de formation. Cette solution a le même potentiel d'inhibition de la plaque dentaire que la solution de chlorhexidine à 0,20%.

En endodontie, les eaux électrolysées acide et neutre possèdent une action antibactérienne efficace sur la flore bactérienne endodontique (bactéries, biofilms). Cependant leur efficacité est inférieure à celle de l'hypochlorite de sodium, de plus la présence de matière organique inhibe leur action. L'eau électrolysée ne peut donc pas se substituer à l'hypochlorite de sodium comme irrigant canalaire. Ces eaux acide et neutre sont très efficaces pour éliminer les débris canaux et la *smear layer*, elles peuvent donc être employées lors de l'irrigation finale. Leur efficacité est identique à celle de l'EDTA pour nettoyer les parois canaux et présentent comme avantage d'entraîner une plus faible déminéralisation de la dentine.

À l'heure actuelle les mécanismes d'action des eaux acide et neutre sur les micro-organismes ne sont pas totalement élucidés. En effet, les rôles précis d'un potentiel d'action élevé et des dérivés du chlore à l'échelle cellulaire restent à définir.



Afin de développer l'utilisation des eaux électrolysées dans les domaines médicaux, il est déterminant de poursuivre les recherches scientifiques et de soumettre ces solutions aux normes d'application européennes NF EN qui autorisent l'utilisation de ces produits désinfectants pour la désinfection des dispositifs médicaux et des mains.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abol-Enein H, Gheith OA, Barakat N, Nour E, Sharaf A-E. Ionized alkaline water: new strategy for management of metabolic acidosis in experimental animals. *Ther Apher Dial.* juin 2009 ; 13(3) : 220-4.
2. Aider M, Gnatko E, Benali M, Plutakhin G, Kastyuchik A. Electro-activated aqueous solutions : Theory and application in the food industry and biotechnology. *Innov Food Sci Emerg Technol.* juill 2012 ; 15 : 38-49.
3. Babb JR, Bradley CR. Choosing instrument disinfectants and processors. *Br J Infect Control.* juin 2001 ; 2(2) : 10-3.
4. Belleguic C, Léna H, Desrues B, Delaval P. Prévention des infections transmises par les endoscopes bronchiques. *Rev Pneumol Clin.* 2001 ; 57(2) : 67-72.
5. Bergmann H, Koparal AT, Koparal AS, Ehrig F. The influence of products and by-products obtained by drinking water electrolysis on microorganisms. *Microchem J.* août 2008 ; 89(2) : 98-107.
6. Bodas R, Bartolomé DJ, Tabernero De Paz MJ, Posado R, García JJ, Rodríguez L, et al. Electrolyzed water as novel technology to improve hygiene of drinking water for dairy ewes. *Res Vet Sci.* déc 2013 ; 95(3) : 1169-70.
7. Bügener E, Kump AW-S, Casteel M, Klein G. Benefits of neutral electrolyzed oxidizing water as a drinking water additive for broiler chickens. *Poult Sci.* sept 2014 ; 93(9) : 2320-6.
8. Chen X, Li P, Wang X, Gu M, Zhao C, Sloan AJ, et al. Ex vivo antimicrobial efficacy of strong acid electrolytic water against *Enterococcus faecalis* biofilm. *Int Endod J.* oct 2013 ; 46(10) : 938-46.
9. Chuang C-Y, Yang S, Chang M-Y, Huang H-C, Luo C-H, Hung P-C, et al. Inactivation efficiency to *Bacillus subtilis* and *Escherichia coli* bacterial aerosols of spraying neutral electrolyzed water. *J Air Waste Manag Assoc* 1995. déc 2013 ; 63(12) : 1447-56.
10. Cloete TE, Thantsha MS, Maluleke MR, Kirkpatrick R. The antimicrobial mechanism of electrochemically activated water against *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* as determined by SDS-PAGE analysis. *J Appl Microbiol.* août 2009 ; 107(2) : 379-84.
11. Cui X, Shang Y, Shi Z, Xin H, Cao W. Physicochemical properties and bactericidal efficiency of neutral and acidic electrolyzed water under different storage conditions. *J Food Eng.* avr 2009 ; 91(4) : 582-6.
12. Ding T, Xuan X-T, Li J, Chen S-G, Liu D-H, Ye X-Q, et al. Disinfection efficacy and mechanism of slightly acidic electrolyzed water on *Staphylococcus aureus* in pure culture. *Food Control.* févr 2016 ; 60 : 505-10.

13. Dong H, Nagamatsu Y, Chen K-K, Tajima K, Kakigawa H, Shi S, et al. Corrosion behavior of dental alloys in various types of electrolyzed water. *Dent Mater J.* déc 2003 ; 22(4) : 482-93.
14. Ekuni D, Tomofuji T, Endo Y, Kasuyama K, Irie K, Azuma T, et al. Hydrogen-rich water prevents lipid deposition in the descending aorta in a rat periodontitis model. *Arch Oral Biol.* déc 2012 ; 57(12) : 1615-22.
15. Feliciano L, Lee J, Pascall MA. Transmission electron microscopic analysis showing structural changes to bacterial cells treated with electrolyzed water and an acidic sanitizer. *J Food Sci.* avr 2012 ; 77(4) : M182-187.
16. Gernhardt CR, Eppendorf K, Kozlowski A, Brandt M. Toxicity of concentrated sodium hypochlorite used as an endodontic irrigant. *Int Endod J.* avr 2004 ; 37(4) : 272-80.
17. Ghisi AC, Kopper PMP, Baldasso FER, Stürmer CP, Rossi-Fedele G, Steier L, et al. Effect of super-oxidized water, sodium hypochlorite and EDTA on dentin microhardness. *Braz Dent J.* oct 2014 ; 25(5) : 420-4.
18. Giles LH, Chan SN, Jarad F, Hope C. The efficacy of different endodontic irrigants against *Enterococcus faecalis* in an extracted human tooth model. *Int Endod J.* avr 2010 ; 43(4) : 353-353.
19. Guentzel JL, Liang Lam K, Callan MA, Emmons SA, Dunham VL. Reduction of bacteria on spinach, lettuce, and surfaces in food service areas using neutral electrolyzed oxidizing water. *Food Microbiol.* févr 2008 ; 25(1) : 36-41.
20. Gulabivala K, Stock CJR, Lewsey JD, Ghori S, Ng Y-L, Spratt DA. Effectiveness of electrochemically activated water as an irrigant in an infected tooth model. *Int Endod J.* sept 2004 ; 37(9) : 624-31.
21. Gunaydin M, Esen S, Karadag A, Unal N, Yanik K, Odabasi H, et al. In vitro antimicrobial activity of Medilox® super-oxidized water. *Ann Clin Microbiol Antimicrob.* juill 2014 ; 13(1) : 29.
22. Gunsolley JC. Clinical efficacy of antimicrobial mouthrinses. *J Dent.* juin 2010 ; 38 (Supplement 1) : S6-10.
23. Hanaoka K, Sun D, Lawrence R, Kamitani Y, Fernandes G. The mechanism of the enhanced antioxidant effects against superoxide anion radicals of reduced water produced by electrolysis. *Biophys Chem.* janv 2004 ; 107(1) : 71-82.
24. Hao J, Li H, Wan Y, Liu H. Combined effect of acidic electrolyzed water (AcEW) and alkaline electrolyzed water (AIEW) on the microbial reduction of fresh-cut cilantro. *Food Control.* avr 2015 ; 50 : 699-704.
25. Hao J, Qiu S, Li H, Chen T, Liu H, Li L. Roles of hydroxyl radicals in electrolyzed oxidizing water (EOW) for the inactivation of *Escherichia coli*. *Int J Food Microbiol.* 16 avr 2012 ; 155(3) : 99-104.

26. Hao J, Wuyundalai, Liu H, Chen T, Zhou Y, Su Y-C, et al. Reduction of pesticide residues on fresh vegetables with electrolyzed water treatment. *J Food Sci.* mai 2011 ; 76(4) : C520-524.
27. Hao X, Cao W, Li B, Zhang Q, Wang C, Ge L. Slightly acidic electrolyzed water for reducing airborne microorganisms in a layer breeding house. *J Air Waste Manag Assoc* 1995. avr 2014 ; 64(4) : 494-500.
28. Hata G, Hayami S, Weine FS, Toda T. Effectiveness of oxidative potential water as a root canal irrigant. *Int Endod J.* 2001 ; 34(4) : 308-17.
29. Henry M, Chambron J. Physico-Chemical, Biological and Therapeutic Characteristics of Electrolyzed Reduced Alkaline Water (ERAW). *Water.* déc 2013 ; 5(4) : 2094-115.
30. Horiba N, Hiratsuka K, Onoe T, Yoshida T, Suzuki K, Matsumoto T, et al. Bactericidal effect of electrolyzed neutral water on bacteria isolated from infected root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* janv 1999 ; 87(1) : 83-7.
31. Hsu S-Y. Effects of flow rate, temperature and salt concentration on chemical and physical properties of electrolyzed oxidizing water. *J Food Eng.* janv 2005 ; 66(2) : 171-6.
32. Huang Y-R, Hung Y-C, Hsu S-Y, Huang Y-W, Hwang D-F. Application of electrolyzed water in the food industry. *Food Control.* avr 2008 ; 19(4) : 329-45.
33. Hülsmann M, Rödig T, Nordmeyer S. Complications during root canal irrigation. *Endod Top.* mars 2007 ; 16(1) : 27-63.
34. Inagaki H, Shibata Y, Obata T, Kawagoe M, Ikeda K, Sato M, et al. Effects of slightly acidic electrolysed drinking water on mice. *Lab Anim.* janv 2011 ; 45(4) : 283-5.
35. Inoue Y, Endo S, Kondo K, Ito H, Omori H, Saito K. Trial of electrolyzed strong acid aqueous solution lavage in the treatment of peritonitis and intraperitoneal abscess. *Artif Organs.* janv 1997 ; 21(1) : 28-31.
36. Issa-Zacharia A, Kamitani Y, Morita K, Iwasaki K. Sanitization potency of slightly acidic electrolyzed water against pure cultures of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*, in comparison with that of other food sanitizers. *Food Control.* mai 2010 ; 21(5) : 740-5.
37. Ito K, Nishida T, Murai S. Inhibitory effects of acid water prepared by an electrolysis apparatus on early plaque formation on specimens of dentine. *J Clin Periodontol.* mai 1996 ; 23(5) : 471-6.
38. Jiménez-Pichardo R, Regalado C, Castaño-Tostado E, Meas-Vong Y, Santos-Cruz J, García-Almendárez BE. Evaluation of electrolyzed water as cleaning and disinfection agent on stainless steel as a model surface in the dairy industry. *Food Control.* févr 2016 ; 60 : 320-8.

39. Kajiyama S, Hasegawa G, Asano M, Hosoda H, Fukui M, Nakamura N, et al. Supplementation of hydrogen-rich water improves lipid and glucose metabolism in patients with type 2 diabetes or impaired glucose tolerance. *Nutr Res.* mars 2008 ; 28(3) : 137-43.
40. Kato S, Saitoh Y, Iwai K, Miwa N. Hydrogen-rich electrolyzed warm water represses wrinkle formation against UVA ray together with type-I collagen production and oxidative-stress diminishment in fibroblasts and cell-injury prevention in keratinocytes. *J Photochem Photobiol B.* janv 2012 ; 106 : 24-33.
41. Keskinen LA, Burke A, Annous BA. Efficacy of chlorine, acidic electrolyzed water and aqueous chlorine dioxide solutions to decontaminate *Escherichia coli* O157:H7 from lettuce leaves. *Int J Food Microbiol.* juin 2009 ; 132(2-3) : 134-40.
42. Kim C, Hung Y-C, Brackett RE. Efficacy of electrolyzed oxidizing (EO) and chemically modified water on different types of foodborne pathogens. *Int J Food Microbiol.* nov 2000 ; 61(2-3) : 199-207.
43. Kim M-J, Jung KH, Uhm YK, Leem K-H, Kim HK. Preservative effect of electrolyzed reduced water on pancreatic beta-cell mass in diabetic db/db mice. *Biol Pharm Bull.* févr 2007 ; 30(2) : 234-6.
44. Kim M-J, Kim HK. Anti-diabetic effects of electrolyzed reduced water in streptozotocin-induced and genetic diabetic mice. *Life Sci.* nov 2006 ; 79(24) : 2288-92.
45. Kiura H, Sano K, Morimatsu S, Nakano T, Morita C, Yamaguchi M, et al. Bactericidal activity of electrolyzed acid water from solution containing sodium chloride at low concentration, in comparison with that at high concentration. *J Microbiol Methods.* mai 2002 ; 49(3) : 285-93.
46. Koseki S, Yoshida K, Kamitani Y, Isobe S, Itoh K. Effect of mild heat pre-treatment with alkaline electrolyzed water on the efficacy of acidic electrolyzed water against *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* on Lettuce. *Food Microbiol.* oct 2004 ; 21(5) : 559-66.
47. Kubota A, Goda T, Tsuru T, Yonekura T, Yagi M, Kawahara H, et al. Efficacy and safety of strong acid electrolyzed water for peritoneal lavage to prevent surgical site infection in patients with perforated appendicitis. *Surg Today.* nov 2014.
48. Kubota A, Nose K, Yonekura T, Kosumi T, Yamauchi K, Oyanagi H. Effect of electrolyzed strong acid water on peritoneal irrigation of experimental perforated peritonitis. *Surg Today.* 2009 ; 39(6) : 514-7.
49. Landa-Solis C, González-Espinosa D, Guzmán-Soriano B, Snyder M, Reyes-Terán G, Torres K, et al. Microcymt: a novel super-oxidized water with neutral pH and disinfectant activity. *J Hosp Infect.* déc 2005 ; 61(4) : 291-9.
50. Lee H-H, Hong S-I, Kim D. Microbial reduction efficacy of various disinfection treatments on fresh-cut cabbage. *Food Sci Nutr.* sept 2014 ; 2(5) : 585-90.

51. Lee KJ, Jin D, Chang BS, Teng YC, Kim DH. The immunological effects of electrolyzed reduced water on the *Echinostoma hortense* infection in C57BL/6 mice. *Biol Pharm Bull.* mars 2009 ; 32(3) : 456-62.
52. Len S-V, Hung Y-C, Chung D, Anderson JL, Erickson MC, Morita K. Effects of storage conditions and pH on chlorine loss in electrolyzed oxidizing (EO) water. *J Agric Food Chem.* janv 2002 ; 50(1) : 209-12.
53. Liao LB, Chen WM, Xiao XM. The generation and inactivation mechanism of oxidation–reduction potential of electrolyzed oxidizing water. *J Food Eng.* févr 2007 ; 78(4) : 1326-32.
54. López FU, Kopper PMP, Bona AD, Steier L, de Figueiredo JAP, Vier-Pelisser FV. Effect of different irrigating solutions and photo-activated therapy for in vivo root canal treatment. *Braz Dent J.* juin 2015 ; 26(3) : 228-33.
55. Marais JT, Brözel VS. Electro-chemically activated water in dental unit water lines. *Br Dent J.* août 1999 ; 187(3) : 154-8.
56. Marais JT, Williams WP. Antimicrobial effectiveness of electro-chemically activated water as an endodontic irrigation solution. *Int Endod J.* 2001 ; 34(3) : 237-43.
57. Marais JT. Cleaning efficacy of a new root canal irrigation solution: a preliminary evaluation. *Int Endod J.* juill 2000 ; 33(4) : 320-5.
58. Middleton AM, Chadwick MV, Sanderson JL, Gaya H. Comparison of a solution of super-oxidized water (Sterilox®) with glutaraldehyde for the disinfection of bronchoscopes, contaminated in vitro with *Mycobacterium tuberculosis* and *Mycobacterium avium-intracellulare* in sputum. *J Hosp Infect.* août 2000 ; 45(4) : 278-82.
59. Mokudai T, Kanno T, Niwano Y. Involvement of reactive oxygen species in the cytotoxic effect of acid-electrolyzed water. *J Toxicol Sci.* 2015 ; 40(1) :13-9.
60. Mokudai T, Nakamura K, Kanno T, Niwano Y. Presence of hydrogen peroxide, a source of hydroxyl radicals, in acid electrolyzed water. *PloS One.* 2012 ; 7(9) : 46392.
61. Morita C, Nishida T, Ito K. Biological toxicity of acid electrolyzed functional water: effect of oral administration on mouse digestive tract and changes in body weight. *Arch Oral Biol.* avr 2011 ; 56(4) : 359-66.
62. Muster D. Antiseptiques en chirurgie dentaire et stomatologie. *EMC - Stomatologie Odontologie.* 2008 ; 28(190) : 10.
63. Nagamatsu Y, Chen K-K, Tajima K, Kakigawa H, Kozono Y. Durability of bactericidal activity in electrolyzed neutral water by storage. *Dent Mater J.* juin 2002 ; 21(2) : 93-104.

64. Nakajima N, Nakano T, Harada F, Taniguchi H, Yokoyama I, Hirose J, et al. Evaluation of disinfective potential of reactivated free chlorine in pooled tap water by electrolysis. *J Microbiol Methods*. mai 2004 ; 57(2) : 163-73.
65. Nakano T, Hayashi H, Wu H, Shimamoto C, Sano K. Disinfection potential of electrolyzed strongly acidic water against *Mycobacteria* : Conditions of disinfection and recovery of disinfection potential by reelectrolysis. *Biomed Res*. 2015 ; 36(2) : 109-13.
66. Neagu C, Jansen H, Gardeniers H, Elwenspoek M. The electrolysis of water: an actuation principle for MEMS with a big opportunity. *Mechatronics*. juin 2000 ; 10(4-5) : 571-81.
67. Nishikawa R, Teruya K, Katakura Y, Osada K, Hamasaki T, Kashiwagi T, et al. Electrolyzed Reduced Water Supplemented with Platinum Nanoparticles Suppresses Promotion of Two-stage Cell Transformation. *Cytotechnology*. janv 2005 ; 47(1-3) : 97-105.
68. Nisola GM, Yang X, Cho E, Han M, Lee C, Chung W-J. Disinfection performances of stored acidic and neutral electrolyzed waters generated from brine solution. *J Environ Sci Health Part A Tox Hazard Subst Environ Eng*. 2011 ; 46(3) : 263-70.
69. Northcutt J, Smith D, Ingram KD, Hinton A, Musgrove M. Recovery of bacteria from broiler carcasses after spray washing with acidified electrolyzed water or sodium hypochlorite solutions. *Poult Sci*. oct 2007 ; 86(10) : 2239-44.
70. Ohsawa I, Nishimaki K, Yamagata K, Ishikawa M, Ohta S. Consumption of hydrogen water prevents atherosclerosis in apolipoprotein E knockout mice. *Biochem Biophys Res Commun*. déc 2008 ; 377(4) : 1195-8.
71. Okajima M, Kanzaki M, Ishibashi Y, Wada Y, Hino F, Kitahara Y, et al. In vitro bactericidal activity against periodontopathic bacteria by electrolyzed ion-reduced water. *Drug Discov Ther*. déc 2011 ; 5(6) : 306-10.
72. Oomori T, Oka T, Inuta T, Arata Y. The Efficiency of Disinfection of Acidic Electrolyzed Water in the Presence of Organic Materials. *Anal Sci*. 2000 ; 16(4) : 365-9.
73. Osafune T, Ehara T, Ito T. Electron microscopic studies on bactericidal effects of electrolyzed acidic water on bacteria derived from kendo protective equipment. *Environ Health Prev Med*. juill 2006 ; 11(4) : 206-14.
74. Ozaki M, Ohshima T, Mukumoto M, Konishi H, Hirashita A, Maeda N, et al. A study for biofilm removing and antimicrobial effects by microbubbled tap water and other functional water, electrolyzed hypochlorite water and ozonated water. *Dent Mater J*. 2012 ; 31(4) : 662-8.

75. Pangloli P, Hung Y-C. Efficacy of slightly acidic electrolyzed water in killing or reducing *Escherichia coli* O157:H7 on iceberg lettuce and tomatoes under simulated food service operation conditions. *J Food Sci.* août 2011 ; 76(6) : 361-6.
76. Park E-J, Alexander E, Taylor GA, Costa R, Kang D-H. The decontaminative effects of acidic electrolyzed water for *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* on green onions and tomatoes with differing organic demands. *Food Microbiol.* juin 2009 ; 26(4) : 386-90.
77. Park H, Hung Y-C, Chung D. Effects of chlorine and pH on efficacy of electrolyzed water for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes*. *Int J Food Microbiol.* févr 2004 ; 91(1) : 13-8.
78. Pintaric R, Matela J, Pintaric S. Suitability of electrolyzed oxidizing water for the disinfection of hard surfaces and equipment in radiology. *J Environ Health Sci Eng.* 2015 ; 13 : 6.
79. Rico D, Martín-Diana AB, Barry-Ryan C, Frías JM, Henehan GTM, Barat JM. Use of neutral electrolysed water (EW) for quality maintenance and shelf-life extension of minimally processed lettuce. *Innov Food Sci Emerg Technol.* janv 2008 ; 9(1) : 37-48.
80. Robinson GM, Lee S W-H, Greenman J, Salisbury VC, Reynolds DM. Evaluation of the efficacy of electrochemically activated solutions against nosocomial pathogens and bacterial endospores. *Lett Appl Microbiol.* mars 2010 ; 50(3) : 289-94.
81. Rossi-Fedele G, Figueiredo JAP de, Steier L, Canullo L, Steier G, Roberts AP. Evaluation of the antimicrobial effect of super-oxidized water (Sterilox®) and sodium hypochlorite against *Enterococcus faecalis* in a bovine root canal model. *J Appl Oral Sci Rev FOB.* oct 2010 ; 18(5) : 498-502.
82. Rossi-Fedele G, Guastalli AR, Dođramacı EJ, Steier L, De Figueiredo J a. P. Influence of pH changes on chlorine-containing endodontic irrigating solutions. *Int Endod J.* sept 2011 ; 44(9) : 792-9.
83. Rutala WA, Weber DJ. New disinfection and sterilization methods. *Emerg Infect Dis.* avr 2001 ; 7(2) : 348-53.
84. Saitoh Y, Harata Y, Mizuhashi F, Nakajima M, Miwa N. Biological safety of neutral-pH hydrogen-enriched electrolyzed water upon mutagenicity, genotoxicity and subchronic oral toxicity. *Toxicol Ind Health.* janv 2010 ; 26(4) : 203-16.
85. Sato Y, Kajiyama S, Amano A, Kondo Y, Sasaki T, Handa S, et al. Hydrogen-rich pure water prevents superoxide formation in brain slices of vitamin C-depleted SMP30/GNL knockout mice. *Biochem Biophys Res Commun.* oct 2008 ; 375(3) : 346-50.
86. Sekiya S, Ohmori K, Harii K. Treatment of infectious skin defects or ulcers with electrolyzed strong acid aqueous solution. *Artif Organs.* janv 1997 ; 21(1) : 32-8.



87. Selkon JB, Babbt JR, Morris R. Evaluation of the antimicrobial activity of a new super-oxidized water, Sterilox®, for the disinfection of endoscopes. *J Hosp Infect.* janv 1999 ; 41(1) : 59-70.
88. Shetty N, Srinivasan S, Holton J, Ridgway GL. Evaluation of microbicidal activity of a new disinfectant: Sterilox® 2500 against *Clostridium difficile* spores, *Helicobacter pylori*, vancomycin resistant *Enterococcus* species, *Candida albicans* and several *Mycobacterium* species. *J Hosp Infect.* févr 1999 ; 41(2) : 101-5.
89. Shimada K, Ito K, Murai S. A comparison of the bactericidal effects and cytotoxic activity of three types of oxidizing water, prepared by electrolysis, as chemical dental plaque control agents. *Int J Antimicrob Agents.* juin 2000 ; 15(1) : 49-53.
90. Shirahata S, Hamasaki T, Teruya K. Advanced research on the health benefit of reduced water. *Trends Food Sci Technol.* févr 2012 ; 23(2) : 124-31.
91. Siqueira JF, Rôças IN, Ricucci D. Biofilms in endodontic infection. *Endod Top.* mars 2010 ; 22(1) : 33-49.
92. Siqueira JF, Rôças IN. Diversity of Endodontic Microbiota Revisited. *J Dent Res.* janv 2009 ; 88(11) : 969-81.
93. Smigic N, Rajkovic A, Antal E, Medic H, Lipnicka B, Uyttendaele M, et al. Treatment of *Escherichia coli* O157:H7 with lactic acid, neutralized electrolyzed oxidizing water and chlorine dioxide followed by growth under sub-optimal conditions of temperature, pH and modified atmosphere. *Food Microbiol.* sept 2009 ; 26(6) : 629-37.
94. Electrochemically activated anolyte and catholyte solutions: a pilot study. *Int Endod J.* nov 2000 ; 33(6) : 494-504.
95. Tamaki S, Bui VN, Ngo LH, Ogawa H, Imai K. Virucidal effect of acidic electrolyzed water and neutral electrolyzed water on avian influenza viruses. *Arch Virol.* mars 2014 ; 159(3) : 405-12.
96. Tanaka H, Hirakata Y, Kaku M, Yoshida R, Takemura H, Mizukane R, et al. Antimicrobial activity of superoxidized water. *J Hosp Infect.* sept 1996 ; 34(1) : 43-9.
97. Tanaka N, Fujisawa T, Daimon T, Fujiwara K, Yamamoto M, et al. The use of electrolyzed solutions for the cleaning and disinfecting of dialyzers. *Artif Organs.* déc 2000 ; 24(12) : 921-8.
98. Tartari T, de Almeida Rodrigues Silva E Souza P, Vila Nova de Almeida B, Carrera Silva Júnior JO, Facíola Pessoa O, Silva E Souza Junior MH. A new weak chelator in endodontics: effects of different irrigation regimens with etidronate on root dentin microhardness. *Int J Dent.* 2013. doi 10.1155/2013/743018.
99. Tomás-Callejas A, Martínez-Hernández GB, Artés F, Artés-Hernández F. Neutral and acidic electrolyzed water as emergent sanitizers for fresh-cut mizuna baby leaves. *Postharvest Biol Technol.* mars 2011 ; 59(3) : 298-306.

100. Tomofuji T, Kawabata Y, Kasuyama K, Endo Y, Yoneda T, Yamane M, et al. Effects of hydrogen-rich water on aging periodontal tissues in rats. *Sci Rep.* 2014 ; 4 : 5534.
101. Tsai C-F, Hsu Y-W, Chen W-K, Chang W-H, Yen C-C, Ho Y-C, et al. Hepatoprotective effect of electrolyzed reduced water against carbon tetrachloride-induced liver damage in mice. *Food Chem Toxicol.* août 2009 ; 47(8) : 2031-6.
102. Urata M, Isomoto H, Murase K, Wada A, Yanagihara K, Hirakata Y, et al. Comparison of the microbicidal activities of superoxidized and ozonated water in the disinfection of endoscopes. *J Int Med Res.* août 2003 ; 31(4) : 299-306.
103. Verdun-Esquer C, Laplace V, Brochard P, Ducombs G, Geniaux M. Pathologie en rapport avec les produits désinfectants et détergents en milieu hospitalier. *ADMP.* 2000 ; 61(8) : 588.
104. Vorobjeva NV. Selective stimulation of the growth of anaerobic microflora in the human intestinal tract by electrolyzed reducing water. *Med Hypotheses.* 2005 ; 64(3) : 543-6.
105. Walker JT, Bradshaw DJ, Bennett AM, Fulford MR, Martin MV, Marsh PD. Microbial Biofilm Formation and Contamination of Dental-Unit Water Systems in General Dental Practice. *Appl Environ Microbiol.* août 2000 ; 66(8) : 3363-7.
106. Wang M, Wang JJ, Sun XH, Pan YJ, Zhao Y. Preliminary mechanism of acidic electrolyzed water ice on improving the quality and safety of shrimp. *Food Chem.* juin 2015 ; 176 : 333-41.
107. Waters BW, Hung Y-C. The Effect of pH and Chloride Concentration on the Stability and Antimicrobial Activity of Chlorine-Based Sanitizers. *J Food Sci.* avr 2014 ; 79(4) : M622-7.
108. Xiong K, Liu H-J, Liu R, Li L-T. Differences in fungicidal efficiency against *Aspergillus flavus* for neutralized and acidic electrolyzed oxidizing waters. *Int J Food Microbiol.* janv 2010 ; 137(1) : 67-75.
109. Xue J, Shang G, Tanaka Y, Saihara Y, Hou L, Velasquez N, et al. Dose-dependent inhibition of gastric injury by hydrogen in alkaline electrolyzed drinking water. *BMC Complement Altern Med.* 2014 ; 14 : 81.
110. Yanik K, Karadag A, Unal N, Odabasi H, Esen S, Gunaydin M. An investigation into the in-vitro effectiveness of electrolyzed water against various microorganisms. *Int J Clin Exp Med.* juill 2015 ; 8(7) : 11463-9.
111. Ye J, Li Y, Hamasaki T, Nakamichi N, Komatsu T, Kashiwagi T, et al. Inhibitory effect of electrolyzed reduced water on tumor angiogenesis. *Biol Pharm Bull.* janv 2008 ; 31(1) : 19-26.

112. Yoon KS, Huang XZ, Yoon YS, Kim S-K, Song SB, Chang BS, et al. Histological study on the effect of electrolyzed reduced water-bathing on UVB radiation-induced skin injury in hairless mice. *Biol Pharm Bull.* 2011 ; 34(11) : 1671-7.
113. Young GR, Parashos P, Messer HH. The principles of techniques for cleaning root canals. *Aust Dent J.* mars 2007 ; 52(1) : 52-63.
114. Zeng X, Ye G, Tang W, Ouyang T, Tian L, Ni Y, et al. Fungicidal efficiency of electrolyzed oxidizing water on *Candida albicans* and its biochemical mechanism. *J Biosci Bioeng.* juill 2011 ; 112(1) : 86-91.
115. Zhang C, Li B, Jadeja R, Hung Y-C. Effects of Electrolyzed Oxidizing Water on Inactivation of *Bacillus subtilis* and *Bacillus cereus* Spores in Suspension and on Carriers. *J Food Sci.* janv 2016 ; 81(1) : 144-149.
116. Zhang C, Lu Z, Li Y, Shang Y, Zhang G, Cao W. Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enteritidis* on mung bean seeds and sprouts by slightly acidic electrolyzed water. *Food Control.* mai 2011 ; 22(5) : 792-6.
117. Zhao Y, Li P, Ge L, Wang Y, Mo T, Zeng X, et al. Effect of electrolyzed reduced water on chiral theanine and polyphenols in tea. *Food Chem.* 15 oct 2012 ; 134(4) : 1761-6.
118. Zinkevich V, Beech IB, Tapper R, Bogdarina I. The effect of super-oxidized water on *Escherichia coli*. *J Hosp Infect.* oct 2000 ; 46(2) : 153-6.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ELECTRONIQUES

119. Bibliothèque virtuelle. Le pH et l'échelle pH [Internet]. [consulté le 3 mai 2016]. Disponible sur : <http://www.alloprof.qc.ca/bv/pages/s1038.aspx>
120. Gautier C. Exigences liées à la désinfection des endoscopes souples non autoclavables. [Internet]. 2010 [consulté le 31 janv 2016]. Disponible sur : [http://www.felin.re/IMG/pdf/Microsoft\\_PowerPoint\\_-\\_Endoscopie072010versimprimable\\_1.pdf](http://www.felin.re/IMG/pdf/Microsoft_PowerPoint_-_Endoscopie072010versimprimable_1.pdf)
121. Kraft A. Electrochemical Water Disinfection : A Short Review [Internet]. *Platinum Metals Rev.* 2008 [consulté le 21 déc 2015] ; 52(3) : 177. Disponible sur : <http://www.technology.matthey.com/article/52/3/177-185/>
122. HAS (Haute Autorité de Santé). Parodontopathies : diagnostic et traitements [Internet]. 2002 [consulté le 16 août 2016]. Disponible sur :

[http://www.has-sante.fr/portail/jcms/c\\_272209/fr/parodontopathies-diagnostic-et-traitements](http://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_272209/fr/parodontopathies-diagnostic-et-traitements)

123. CNRS. La Chimie au Lycée. Acidité-basicité : pH [Internet]. [consulté le 19 mai 2016]. Disponible sur :

<http://www.cnrs.fr/cnrs-images/chimieulycee/THEMES/acidite/ph.htm>

124. ADF. Les Dossiers de l'ADF [Internet]. 2013 [consulté le 20 janv 2016].

Disponible sur :

<http://www.adf.asso.fr/fr/espace-formation/publications/dossiers-de-ladf>

125. CCLIN. Les normes d'évaluation d'activité des désinfectants [Internet]. [consulté le 16 avr 2016].

Disponible sur :

<http://www.cclinparisnord.org/REGION/NPC/PH100108/NormesFD.pdf>

126. Trevor V Suslow. Oxidation-Reduction Potential (ORP) for Water Disinfection Monitoring, Control, and Documentation. [Internet]. 2004 [consulté le 16 août 2016].

Disponible sur :

<http://furrowpump.com/oxidation-reduction-potential-orp-for-water-disinfection-monitoring-control-and-documentation-trevor-v-suslow-author-anr-publication-8149-2004/>

127. James, C.N., R. Copeland and D A. Relationships between oxidation-reduction potential, oxidant, and pH in drinking water. [Internet]. 2004. [consulté le 19 mai 2016].

Disponible sur :

[https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?dirEntryId=125092](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=125092)

128. Jacques F. Bonnes pratiques hygiène en hémodialyse. [Internet]. 2005 [consulté le 31 janv 2016].

Disponible sur :

[https://sf2h.net/wp-content/uploads/2005/04/SF2H\\_bonnes-pratiques-hygiene-en-hemodialyse-2005.pdf](https://sf2h.net/wp-content/uploads/2005/04/SF2H_bonnes-pratiques-hygiene-en-hemodialyse-2005.pdf)

129. Heller R. Oxydoreductions, biologie [Internet]. Dans : Encyclopedia Universalis. [consulté le 5 mai 2016].

Disponible sur :

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/oxydoreductions-biologie/>

# Table des matières

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>16</b>
<b>LES EAUX IONISEES.....</b>	<b>17</b>
<b>1. Mécanismes d'action .....</b>	<b>17</b>
1.1. Principe de base.....	17
1.2. Potentiel d'hydrogène.....	17
1.2.1. Définition.....	17
1.2.2. Influence du pH sur l'eau ionisée.....	18
1.3. Potentiel d'oxydo-réduction .....	20
1.3.1. Définition.....	20
1.3.2. Rôle du POR dans l'eau ionisée.....	21
1.4. Chlore actif .....	21
1.4.1. Définition.....	21
1.4.2. Concentration en chlore actif.....	22
1.5. Mécanismes d'action des eaux ionisées acide et neutre .....	22
1.5.1. Signalisation cellulaire .....	22
1.5.2. Modification de la structure cellulaire.....	23
1.5.3. Perturbation du métabolisme cellulaire.....	23
<b>2. Description .....</b>	<b>24</b>
2.1. Les différentes eaux ionisées.....	24
2.1.1. Eau acide.....	24
2.1.2. Eau alcaline .....	24
2.1.3. Eau neutre .....	24
2.2. Procédés de fabrication.....	24

2.2.1. L'électrolyseur.....	24
2.2.2. Dispositif avec membrane semi-perméable.....	25
2.2.3. Dispositif sans membrane semi-perméable.....	27
2.2.4. Electrolyseur destiné aux particuliers .....	28
2.2.5. Paramètres de l'électrolyseur .....	28
2.3. Réactions chimiques .....	29
2.3.1. L'électrolyse .....	29
2.3.2. Molécules actives .....	31
2.4. Biocompatibilité .....	31
2.5. Toxicité .....	31
2.6. Corrosion.....	32
<b>3. Propriétés des eaux ionisées .....</b>	<b>32</b>
3.1. Consommation de l'eau alcaline réductrice.....	32
3.1.1. Troubles digestifs.....	32
3.1.2. Pouvoir antioxydant .....	33
3.2. Stabilité des solutions ionisées .....	34
3.2.1. Conditions de stockage .....	34
3.2.2. Contact avec l'air .....	34
3.2.3. Exposition à la lumière.....	35
3.2.4. Température .....	35
3.3. Spectre d'activité des eaux électrolysées acide et neutre.....	36
3.3.1. Normes de désinfection .....	36
3.3.2. Action antibactérienne .....	37
3.3.3. Action fongicide .....	39
3.3.4. Action sporicide .....	40

3.3.5. Action virucide .....	41
3.4. Place des eaux ionisées acide et neutre dans l'éventail des produits désinfectants .....	42
3.4.1. Les produits désinfectants .....	42
3.4.2. Comparaison de l'eau ionisée avec d'autres produits désinfectants .....	43
<b>INTERETS DES EAUX IONISEES DANS L'AGRICULTURE .....</b>	<b>46</b>
<b>1. Spectre d'activité .....</b>	<b>46</b>
1.1. Contamination des produits agricoles .....	46
1.2. Action sur les germes retrouvés dans l'agriculture.....	46
1.3. Comparaison avec l'hypochlorite de sodium .....	48
<b>2. Utilisation des eaux ionisées dans l'industrie agro-alimentaire .....</b>	<b>48</b>
2.1. Lavage des produits alimentaires.....	48
2.2. Réduction des pesticides .....	49
2.3. Conservation des produits.....	49
2.4. Qualité de l'eau de consommation .....	49
2.5. Qualité de l'environnement.....	49
<b>UTILISATION DE L'EAU IONISEE EN MEDECINE .....</b>	<b>51</b>
<b>1. Désinfection du matériel médical et des locaux.....</b>	<b>51</b>
1.1. Les endoscopes .....	51
1.2. Les hémodialyseurs .....	52
1.3. Le matériel radiologique .....	52
1.4. Les units dentaires .....	53
1.5. Les surfaces hospitalières .....	53
<b>2. Prévention des infections nosocomiales .....</b>	<b>54</b>
2.1. Les micro-organismes nosocomiaux.....	54

2.2.	Bloc opératoire .....	54
3.	Influences des eaux électrolysées sur les maladies chroniques .....	55
3.1.	Le stress oxydatif .....	55
3.2.	Le diabète.....	56
3.3.	L'angiogenèse tumorale .....	56
3.4.	L'athérosclérose .....	57
3.5.	La peau .....	57
3.6.	Acidose métabolique .....	57
<b>APPLICATIONS ODONTOLOGIQUES .....</b>		<b>59</b>
<b>1.</b>	<b>Apports de l'eau ionisée en parodontologie.....</b>	<b>59</b>
1.1.	Généralités .....	59
1.2.	Action antibactérienne.....	59
1.3.	Intérêts dans le traitement de la gingivite et de la parodontite .....	60
<b>2.</b>	<b>Place de l'eau ionisée en endodontie.....</b>	<b>61</b>
2.1.	Rôle d'irrigant canalaire.....	61
2.1.1.	Généralités .....	61
2.1.2.	Efficacité sur les germes endodontiques .....	62
2.1.3.	Comparaison de l'eau électrolysée acide avec NaClO.....	64
2.2.	Action de l'eau ionisée sur la <i>smear layer</i> et les débris canaux .....	65
2.2.1.	Rôle dans l'irrigation finale.....	65
2.2.2.	Impact des solutions d'irrigation sur la dentine radiculaire .....	66
2.2.3.	Comparaison de l'eau ionisée acide avec l'EDTA.....	67
2.3.	Action des eaux ionisées sur les dents infectées.....	67
2.3.1.	Action sur <i>Enterococcus faecalis</i> .....	67
2.3.2.	Élimination du biofilm bactérien endodontique .....	68



<b>CONCLUSION.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ELECTRONIQUES.....</b>	<b>81</b>

**GUERCIF Rachid – L'eau ionisée : des applications médicales aux applications odontologiques.**

Nancy 2016 : 87 pages. 8 figures ; 17 tableaux.

Th. : Chir.- Dent. : Université de Lorraine : 2016

**Mots-clefs :**

- Endodontie
- Parodontologie
- Eau ionisée
- Désinfectant
- Irrigation

**Résumé :**

Les eaux ionisées sont issues de l'électrolyse d'une solution d'eau contenant une faible quantité de NaCl, elles peuvent être acides, neutre ou basique.

Les eaux ionisées acide et neutre possèdent un fort potentiel d'oxydoréduction, une concentration en chlore actif et des qualités antibactériennes à large spectre. Au Japon et en Russie, elles sont utilisées comme solutions désinfectantes.

L'eau ionisée alcaline est une eau de consommation aux vertus antioxydantes qui permet notamment de soulager les troubles digestifs et de lutter contre le stress oxydatif impliqué dans les maladies chroniques.

Ce travail a pour objectif de présenter ces différentes eaux ionisées, leurs champs d'application dans l'agriculture, en médecine et en odontologie où elles peuvent, plus particulièrement, trouver leur place en parodontologie et en endodontie.

**Membres du jury :**

Pr. P. AMBROSINI	Professeur des Universités	Président
<u>Dr. M. ENGELS-DEUTSCH</u>	<u>Maître de Conférences</u>	<u>Directeur de thèse</u>
Dr. M. VINCENT	Maître de Conférences Associé	Juge
M. J-B. PUISSEGUR	Masseur-kinésithérapeute	Membre Invité

**Adresse de l'auteur :**

Rachid GUERCIF  
79 rue de Belfort  
25000 BESANCON

Jury : Président : P. AMBROSINI– Professeur des Universités  
Juges : M. ENGELS-DEUTSCH– Maître de Conférence des Universités  
M. VINCENT– Maître de Conférences associé  
J.B. PUISSEUR– Masseur Kinésithérapeute

Thèse pour obtenir le diplôme D'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire

Présentée par: **Monsieur GUERCIF Rachid**

né(e) à: **SAINT-CLAUDE (Jura)**

le **4 avril 1990**

et ayant pour titre : « **L'eau ionisée : des applications médicales aux applications  
odontologiques** ».

Le Président du jury



P. AMBROSINI

Le Doyen  
de la Faculté d'Odontologie



Le Doyen  
M. MARTRETTE

J.M. MARTRETTE

Autorise à soutenir et imprimer la thèse 9294

NANCY, le 11 OCT. 2016

Le Président de l'Université de Lorraine



P. MUTZENHARDT