



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah  
Faculté des Sciences et Techniques  
[www.fst-usmba.ac.ma](http://www.fst-usmba.ac.ma)



Année universitaire : 2014-2015  
Master Sciences et Techniques : Biotechnologie microbienne  
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**TRAITEMENTS PREVENTIFS DU BOIS DE CEDRE PAR  
PLASMA ET ETUDE DE L'EVOLUTION DES PROPRIETES  
PHYSICOCHIMIQUES ET DU POTENTIEL ANTIDHESIF  
SUR LES SPORES FONGIQUES**

**Présenté par :**

- Ilham MAKRAN

**Soutenu le 27 Juin 2015 devant l'honorable  
jury composé de :**

- Pr. Saad Ibnsouda Koraichi
- Pr. Soumya Elabed
- Pr. Omar El Farricha
- Pr. Abdellatif Boukir

**Encadré par:**

-Pr. Saad IBNSOUDA KORAICHI  
- Pr. Soumya ELABED

**Lieu du stage : Laboratoire de biotechnologie microbienne de la  
FST Fès.**

-----  
Faculté Des Sciences et Techniques de Fès, route d'Imouzzer b.p. 2202 -Fès-Maroc

Tél. +212 (0) 535 60 80 14 – +212 (0) 535 60 96 35 – +212 (0) 535 60 29 53 Fax : +212 (0) 535 60 82 14

## Remerciements

*Au terme de ce travail, j'ai le plaisir d'exprimer mes sincères remerciements au Professeur **Saad IBNSOUDA KORAICHI**, Madame le professeur **Soumya El ABED** pour m'avoir accueilli au sein de laboratoire de biotechnologie microbienne, pour leur formation, leur encadrement consciencieux durant ce stage, leur grande disponibilité et leur conseils avisés qui ont permis de faire évoluer ce travail à grand pas.*

*Un grand merci également aux professeurs **Abdellatif BOUKIR** et **Omar El FARRICHA** pour avoir examiné et évalué ce modeste travail.*

*Je tiens ensuite à exprimer toute ma reconnaissance et à remercier très chaleureusement, Docteur **Hassan BARKAI MAIDE** pour son humanité, sa grande implication dans ce projet et son enthousiasme de chaque instant. Auprès d'Hassan et grâce à sa rigueur scientifique, j'ai pu progresser et apprendre ce qu'est le métier de chercheur. Merci à lui pour sa disponibilité, son soutien, ses explications et ses encouragements tout au long de ces Quatre mois.*

*Ainsi, je remercie Professeur **Abdellatif HAGGOUR**, responsable du Master Biotechnologie Microbienne, pour sa patience, son dynamisme et sa motivation au quotidien durant ces deux années de master.*

*Bien évidemment, je souhaite remercier mes très chers parents, mes sœurs et frères qui ont toujours été là pour moi tout au long de mes études et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.*

*J'adresse mes profondes amitiés aux doctorants et étudiants que j'ai eu le plaisir de côtoyer au laboratoire et en-dehors Moulay Sadiki, Mounir Balouiri, , El abed Alae ,Amal El aabedy ,Sara Lebrazi, Yassir Lekbach ,Aziza Couchou , Asmae Mesbah , Fadoua Bennouna , Meryem El asri, Maroua Chraïbi, Oumaima Amine, Ahmed Naciri , Ilyass Tabrika ,Halim Bakkali ,Meryem Boukaa ,Meryem Merzake , Nawal Akrassi ,Aziza Mahni , Selma El hassouni ,Naima El yamni ,Wijdane kerkibou ,Ayoub tahri joutei ,Driss Makran, Zouhir Chihab, Adrien lapointe , Philippe Labat , Mohamed El balkoum , Nabil Tirryt ,Nouh zaaboul .Une "spéciale" dédicace à chacun de vous (sans développer car je vais allégrement dépasser le nombre de pages alloué !).*

# Merci tout le Monde...

## Table des matières

Introduction .....	1
--------------------	---

### REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

#### **Chapitre I : Biofilm**

I. Définition et étapes conduisant à la formation d'un biofilm.....	3
1.1. Définition et historique.....	3
1.2. Formation d'un biofilm.....	3
a. Film conditionnant.....	4
b. Transport des bactéries vers le support.....	4
c. Adhésion des bactéries.....	4
d. Maturation du biofilm.....	5
e. Détachement de cellules bactérienne.....	5
II. Impacts négatifs liés à l'adhésion microbienne.....	5
III. Impacts positifs liés à l'adhésion microbienne.....	7
IV. Moyens de lutte contre la présence de biofilms.....	7
4.1. Dépôt de couches minces par procédé plasma et la mise au point de surfaces biocides.....	7
4.2. Implantation ionique.....	8
4.3. Combinaison plasma - huile essentielle ou plasma- vapeur d'huile.....	8

#### **Chapitre II: Techniques de traitement de surfaces**

I. Définition.....	10
II. Pourquoi un traitement de surface ?.....	10
III. Différents techniques de traitements de surfaces.....	10
3.1. Techniques de traitement par voie humide.....	10
3.1.1. Procédés électrolytiques.....	10

3.1.2. Procédés chimiques.....	11
3.1.3. Procédé par immersion.....	11
3.2. Techniques de traitement par voie sèche (TSVS).....	11
3.2.1 .Projection thermique.....	11
a. Dépôt physique en phase vapeur (PVD : Physical Vapour Deposition).....	12
b. Dépôt Chimique en phase Vapeur (CVD : Chemical Vapour Deposition).....	12
c. Plasma.....	12
1. Définition.....	12
2. Grandeurs caractéristiques de plasma.....	13
3. Classification.....	14
3.1. Plasmas chauds.....	14
3.2. Plasmas froids.....	14
3.2.1. Plasmas thermiques.....	14
3.2.2. Plasmas non thermiques.....	14
a. Plasmas atmosphériques.....	14
1. Décharges électriques.....	14
b. Plasmas à basse pression.....	15
1. Décharges lumineuses.....	16
2. Décharges micro-ondes.....	16
3. Décharges radiofréquence.....	16
 <b><u>Chapitre III</u> : Traitement de surfaces par plasma</b>	
I. Introduction.....	17
II. Interactions plasma-surface.....	17
2.1. Traitement préventive.....	17

a. Effets physico chimiques.....	17
b. Effets anti-adhésifs.....	20
2.2. Traitement curatif.....	21

#### **Chapitre IV : Traitement du bois par plasma**

I. Généralités sur le matériau bois.....	24
1.1. Composition chimique.....	24
a. Substances macromoléculaires.....	24
b. Substances de faible masse moléculaire.....	24
1.2. Dégradation de bois par les microorganismes.....	25
a. Pourritures cubiques.....	25
b. Pourritures fibreuses blanche.....	25
c. Pourritures molle.....	25
II. Traitement du bois par plasma.....	25

### **MATERIEL ET METHODES**

I. Matériel.....	28
1.1. Souches fongiques.....	28
1.2. Substrat utilisé.....	28
1.3. Milieu de culture.....	28
II. Méthodes.....	29
2.1. Adhésion microbienne sur le bois de cèdre.....	29
2.1.2. Préparation des suspensions fongiques.....	29
2.1.2. Test de l'adhésion.....	29
2.3. Caractérisation physico chimiques des surfaces.....	30
2.3.1. Angle de contact.....	30
2.3.3. Observation par microscopie Electronique à Balayage Environnemental.....	32

### **RESULTATS ET DISCUSSION**

I. Caractérisations physico-chimiques de la surface du substrat.....	34
--	----

1.1. Détermination de l'hydrophobicité et du caractère donneur - accepteur d'électrons du bois cèdre.....	34
1.2. Caractéristiques physico-chimiques de la surface du bois de cèdre après traitement plasma.....	35
1.2.1. Détermination de l'hydrophobicité.....	35
2.2. Détermination du caractère donneur et accepteur d'électrons.....	40
II. Adhésion expérimentale des micro-organismes au bois de cèdre: observation microscopique.....	43
Conclusion et perspectives.....	49
Références bibliographique.....	50
Annexes.....	63

## Liste des abréviations

- **CVD** Chemical Vapour Deposition
- **PVD** Physical Vapour Deposition
- **PEI** Polyéthérimide
- **PS** Polysulfone
- **Pam** Polyamide
- **PET** Poly (éthylène téréphtalate)
- **PP** Polypropylène
- **HMDS** Hexamethyldisiloxane
- **DBD** Décharge à barrière diélectrique
- **APP** Atmospheric pressure plasma jet
- **MW** Micro-onde
- **He** Hélium
- **Ar** Argon
- **MEBE** Microscopie Electronique à Balayage Environnemental
- **K** Kelvin
- **PE** Polyéthylène
- **MRS** Gélose de Man, Rogosa, Sharpe
- **NT** Non traité
- **MKz** Mégahertz

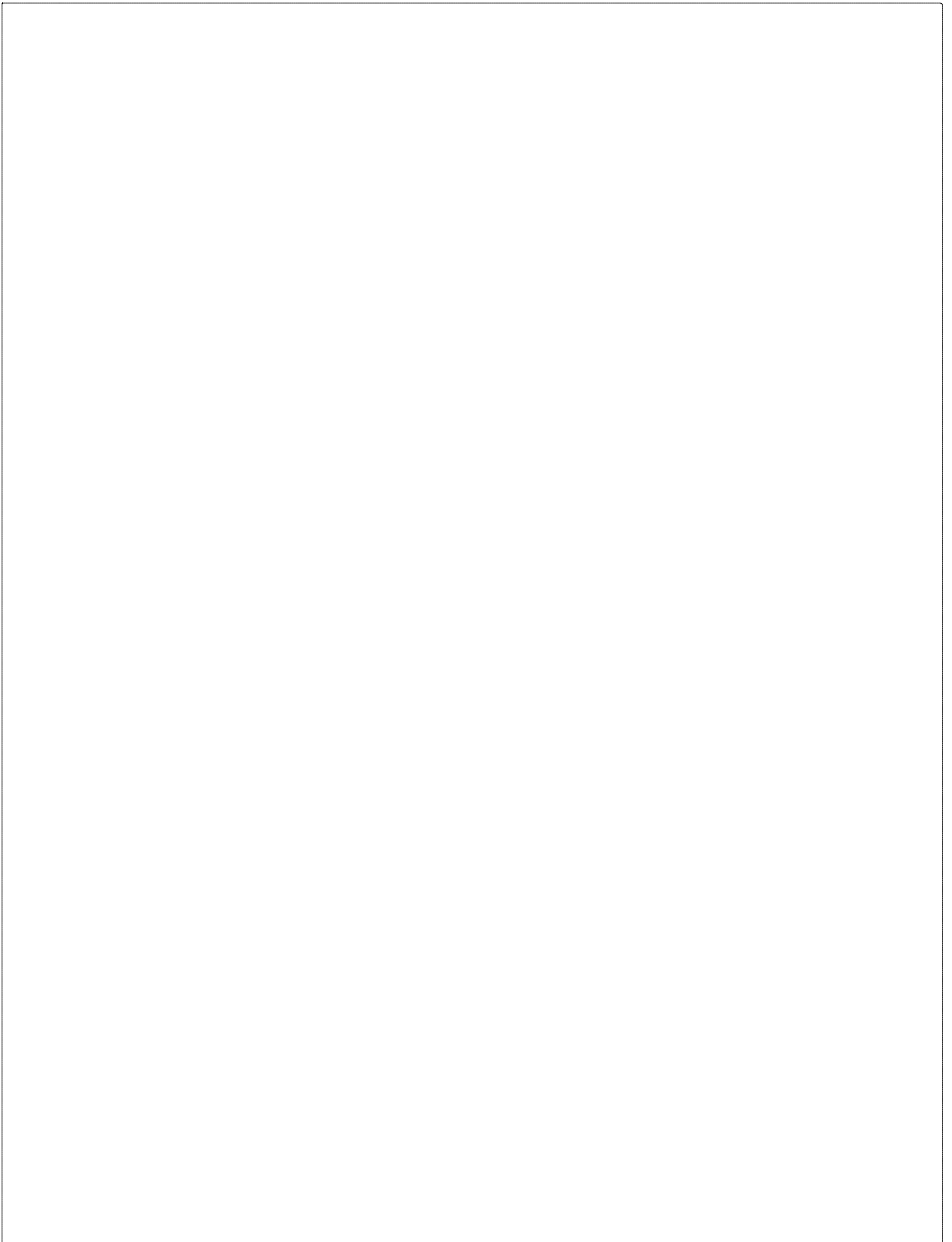


- **KHz** Kilohertz
- **T** Traité
- **PTEF** Polytetrafluoroéthylène
- **EM** Extrait de malt
- **SF6** Hexafluorure de soufre
- **LB** Luria Bertani
- **MO** Microrganismes
- **Md** Matériaux dentaire
- **UFC** Unité formant colonie
- **D** Diiodométhane( $\text{CH}_2\text{I}_2$ )
- **F** Formamide( $\text{CH}_3\text{NO}$ )
- **W** Water ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- **RF** Radiofréquence
- **Te** Température électronique
- **Ti** Température ionique
- **PAL** Poly (L.acide lactique)
- **EPS** Substances polymériques extracellulaires

## Liste des figures/Tableaux

<b>Figure 1</b> Représentation schématique du cycle de vie d'un biofilm selon (Costerton 1999) .....	<b>4</b>
<b>Figure 2</b> Représentation schématique des quatre états de la matière (Abd Jelil .2011).....	<b>13</b>
<b>Figure 4</b> Technique de mesure d'angle de contact de la goutte posée (Sallou 2009).....	<b>30</b>
<b>Figure 3</b> Appareil d'angle de contact .....	<b>32</b>
<b>Figure 5</b> Microscope Electronique à Balayage Environnemental (FEI, compagnie).....	<b>32</b>
<b>Figure 6</b> Hydrophobicité qualitative du bois de cèdre en fonction du traitement plasma.....	<b>37</b>
<b>Figure 7</b> Hydrophobicité quantitative du bois de cèdre en fonction du traitement plasma .....	<b>37</b>
<b>Figure 8</b> Caractère donneur accepteur d'électrons du bois de cèdre en fonction du traitement plasma .....	<b>41</b>
<b>Figure 9</b> Cliché microscopiques de l'adhésion de la souche <i>Penicillium expansum</i> à la surface du bois de cèdre (× 1000).....	<b>43</b>
<b>Tableau 1</b> Les effets des biofilms dans différents secteurs.....	<b>5</b>
<b>Tableau 2</b> Revue des différents travaux concernant la physico-chimie des surfaces traitées avec différentes sources de plasma.....	<b>18</b>
<b>Tableau 3</b> Revue des différents travaux concernant l'activité adhésive des surfaces traitées avec différentes sources de plasma.....	<b>20</b>
<b>Tableau 4</b> Assortiment des résultats d'inactivation obtenus récemment avec différents sources de plasma.....	<b>23</b>

<b>Tableau</b>	<b>5</b>	Récapitulatif des différents échantillons étudiés.....	<b>28</b>
<b>Tableau</b>	<b>6</b>	Composantes Van der waals, accepteur d'électrons et donneur d'électrons de l'énergie libre des trois liquides utilisés dans la méthode des angles de contacts.....	<b>31</b>
<b>Tableau</b>	<b>7</b>	Angle de contact par rapport aux différents solvants ,énergie libre d'interaction ( $\Delta G_{iwi}$ ) ,composantes de Van der Waals ( $\gamma_{LW}$ ), composantes donneurs d'électrons ( $\gamma^+$ ) et d'accepteurs d'électrons ( $\gamma^-$ ) du bois de cèdre (n=3).....	
<b>Tableau</b>	<b>8</b>	Angle de contact par rapport aux différents solvants ,énergie libre d'interaction ( $\Delta G_{iwi}$ ) du bois de cèdre après traitement (n=3).....	<b>36</b>
<b>Tableau</b>	<b>9</b>	Composantes de Van der Waals ( $\gamma_{LW}$ ), composantes donneurs d'électrons ( $\gamma^+$ ) et d'accepteurs d'électrons ( $\gamma^-$ ) du bois de cèdre après traitement (n=3).....	<b>41</b>
<b>Tableau</b>	<b>10</b>	Composition du milieu de culture utilisé.....	<b>63</b>
<b>Tableau</b>	<b>11</b>	Composition de la solution de $KNO_3$ 0,1 M (0,5 L).....	<b>63</b>



# Introduction

Dans le contexte actuel, visant à valoriser le développement durable, le bois connaît un retour d'intérêt auprès des industriels et du grand public. En effet, il s'agit l'un des plus anciens matériaux utilisés par l'être humain. Actuellement, il est beaucoup employé comme matériau massif dans la construction et les aménagements collectifs extérieurs (murs antibruit, poteaux téléphoniques...), Toutefois, le caractère naturel et biodégradable du bois constitue la barrière principale à sa mise en œuvre et à son utilisation. En effet, ce matériau particulièrement sensible à son environnement est susceptible d'être altéré par des organismes biologiques (insectes, bactéries, champignons).

Les traitements réalisés à l'heure actuelle pour préserver le bois des attaques par les champignons de bleuissement consistent en un trempage de celui-ci dans des produits chimiques antifongiques en solution. Or, ce procédé n'est pas totalement satisfaisant, avec le souci accru de préservation de l'environnement (inquiétude qui tend à éliminer les produits toxiques générés par le traitement chimique).

Depuis de nombreuses années, les plasmas froids ont prouvé leur potentialité dans le domaine du traitement de surface sur tous les types de matériaux. Les nombreuses espèces créées au sein de ces gaz partiellement ionisés interagissent avec la surface du matériau permettant de cette façon une modification spécifique des propriétés de supports (physicochimiques, physiques et mécaniques) tout en conservant les caractéristiques intrinsèques du matériau d'origine.

Dans le cadre de cette problématique, le présent travail propose d'étudier l'effet des traitements plasma, sous différents types de gaz plasmagènes sur la physico-chimie de la surface du bois de cèdre et leur activité antifongiques.

Le manuscrit est présenté sous la forme de trois parties :

Dans la première partie, des généralités sur les différents domaines abordés seront énoncées de façon à introduire la problématique du sujet de ce mémoire.

La seconde partie sera consacrée aux matériel et méthodes. Nous y décrirons les différentes manipulations réalisées durant toute la durée du stage.

**La dernière partie sera destinée à exposer l'ensemble des résultats obtenus**



*Revue  
bibliographique*

---

# Chapitre I : BIOFILM

## I. Définition et étapes conduisant à la formation d'un biofilm

### 1.1. Définition et historique

Le monde microbien dans son ensemble n'a été révélé qu'au XVIIème siècle lorsqu'Anthonie van Leeuwenhoek observa des microorganismes au microscope (Donlan et Costerton .2002). Plus récemment en 1934, Claude Zobell examina les populations marines par microscopie et montra que des bactéries adhèrent sur des surfaces pour former des populations sessiles. Cependant, ce n'est qu'en 1978 que Costerton émit la théorie indiquant que la forme sessile est la plus prépondérante sous laquelle se trouvent les microorganismes au sein d'un écosystème et en proposa une définition. Depuis son appellation, la définition du biofilm a évolué au cours du temps (Costerton et al.1978). Le terme actuel représente un consortium fonctionnel de microorganismes (bactéries, champignons, algues ou protozoaires), caractérisé par :

- i) un attachement irréversible de ces micro-organismes à un substrat ou à une interface
- ii) la production d'une matrice polymérique extracellulaire (appelée glycocalyx ou slime)

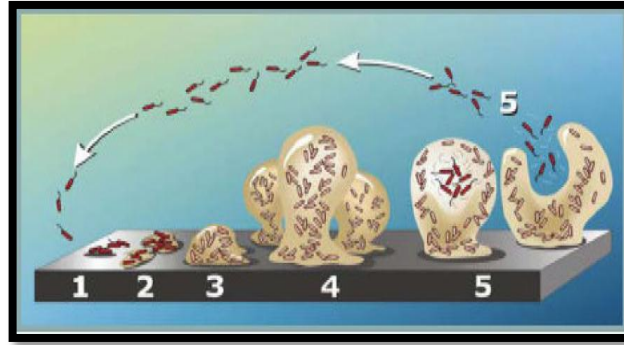
Le biofilm peut être formé d'une ou plusieurs espèces de micro-organismes ; et selon les espèces qui le constituent, Il est composé de 10 à 25% de cellules et de 65 à 90% de matrice polymérique extracellulaire.

### 1.2. Formation d'un biofilm

La formation d'un biofilm a été largement décrite dans des études récentes par plusieurs chercheurs (Donlan et Costerton.2002; Hall-Stoodleey et al.2004; Kolter et al.2006 ; La Barre et al.2007 ;Brelles et al. 2005;Römling et al.2014)

La compréhension des mécanismes de formation d'un biofilm est importante pour explorer les différentes stratégies de lutte contre la création de ces biofilms. Cette formation se déroule en 5 étapes principales (Figure 1) :





**Figure.1** : Représentation schématique du cycle de vie d'un biofilm selon (Costerton 1999)

### **a. Film conditionnant**

Avant que les bactéries ne viennent au contact du support il y'a l'établissement d'un film primaire appelé encore "film conditionnant", facilitant l'attachement des bactéries (Pasmore et al.2003). Il s'agit d'une adsorption spontanée des molécules chargées (protéines, peptides sucres, sels minéraux...) (Baier et al .1972;Compère et al.2001), et dont l'adsorption de ces molécules confèrent de nouvelles propriétés physico-chimiques à la surface (énergie libre de surface, hydrophobicité, charges électrostatiques, etc...), créant ainsi des micro-niches favorables à l'adhésion stable des bactérie. Ce film conditionnant constitue alors la première étape des mécanismes de formation de biofilm. (Figure 1-1)

### **b. Transport des bactéries vers le support**

La deuxième étape de formation de biofilm est le transport, ou le déplacement, des bactéries vers le support nouvellement conditionné (Figure 1-2). Il existe deux types d'approche des bactéries vers le support. La première approche, de type passive, dépend des propriétés dynamiques du milieu dans lequel se trouvent les microorganismes (Donlan et Costerton.2002). La deuxième approche, de type active, met en évidence la locomotion autonome des microorganismes qui s'effectue généralement à l'aide des appendices générateurs de mouvement (pili, flagelles). (Thomas et al. 2002)

### **c. Adhésion des bactéries**

Les cellules bactériennes adhèrent de manière réversible au surface « conditionnée », principalement par des liaisons chimiques non covalentes (liaisons électrostatiques, hydrophobes, Van der Waals et acide/base de Lewis) (Figure 1-3). Lorsque ces liaisons sont maintenues

longtemps, de nouveaux mécanismes chimiques et physiques se mettent en place et les rendent permanentes et irréversibles (Costerton et al.1978; Costerton et al.1981). L'attachement des cellules à la surface induit en effet une cascade de changements physiologiques, conduisant dans la plupart des cas à la production de substances exopolymériques (EPS, principalement composées de protéines et de polysaccharides), qui constituent la matrice extracellulaire protectrice et augmentent la capacité d'ancrage des microorganismes à la surface. L'adhésion devient alors irréversible.(Branda et al. 2005)

#### **d. Maturation du biofilm**

La maturation du biofilm est caractérisée par la multiplication des cellules bactériennes adhérentes à la surface et conduit donc à la formation de colonies qui vont recouvrir en partie ou en totalité la surface. Le biofilm mature est un système biologique dynamique en équilibre entre la production des nouvelles cellules et le détachement.(Tolker-Nielsen et al.2000)(Figure1-4)

#### **e. Détachement de cellules bactériennes**

La dernière étape du cycle de vie du biofilm, dite planctonique .Suite à certains stress, tels des carences nutritionnelles ou des modifications physico-chimiques de l'environnement, des microorganismes, individuels ou groupés au sein de fragments, peuvent retourner à l'état planctonique et coloniser d'autres surfaces.(Parsek et al. 2005)

## **II. Impacts négatifs liés à l'adhésion microbienne**

Les biofilms sont connus pour causer de graves problèmes dans nombreux domaines : la santé (pose d'implants, infections bactériennes, plaque dentaire), l'industrie (agroalimentaire, textile, traitement des eaux usées, échangeurs de chaleur comme les centrales nucléaires), et tous les domaines nécessitant une immersion totale ou en partie de structures solides.

Une revue des différents problèmes liés aux biofilms est résumée dans le Tableau 1 :

### **Tableau .1. : Les effets des biofilms dans différents secteurs**

Secteurs industriels touchés	Problèmes liés aux biofilms et applications	Référence
Industrie énergétique Energie solaire Contrôle de la qualité de l'eau Industrie chimique Marine nationale Industries Navales Marine nationale	<p><u>Réduction des transferts de chaleur</u></p> <p>La formation des biofilms dans les tubes de condensation et les systèmes de remplissage des tours de refroidissement entraîne des pertes énergétiques.</p> <p><u>Augmentation de la résistance des fluides</u></p> <p>La formation des biofilms dans les systèmes de circulation d'eau et dans les tubes de condensation et d'énergie de chaleur augmente la consommation d'énergie des systèmes de pompage, réduit la capacité des systèmes de gravité et entraîne des pertes énergétiques.</p> <p>La formation des biofilms sur les coques des bateaux entraîne une augmentation de la consommation de fuel.</p>	(Rubio et al. 2014) (Cowle et al. 2014) (Marcia et al. 2015)    (Carvalho et al. 2014)
<b><u>Transfert de masse et transformation chimiques</u></b>		
Industrie énergétique Industries chimiques	La corrosion accélérée due aux transformations présentes dans les couches profondes des biofilms entraîne une détérioration des matériaux dans les tubes de condensations métalliques, les conduits d'égoût et les systèmes de refroidissement.	
Marine nationale Contrôle de la qualité de l'eau	La formation des biofilms sur les systèmes de commande, les périscopes, les vitres d'observation ..., diminue leur efficacité.	(Marc . 2002 ) (Nya et al .2015)
Santé publique Santé dentaire Santé humaine	<p>La formation et le détachement des biofilms dans les systèmes de distribution d'eau influent sur la qualité de l'eau.</p> <p>La formation des biofilms sur les dents est responsable de la plaque dentaire et des caries.</p> <p>L'attachement des micro-organismes sur les tissus animaux entraîne des maladies pulmonaires et des tractus digestif et urinaire.</p>	 (Abdallah et al. 2014) (Römling et al. 2014)
Traitement des eaux usées Traitement de l'eau	L'extraction et l'oxydation de composés organiques et inorganiques de l'eau et des eaux usées permettent de réduire le niveau de pollution.	(Guieysse et al 2014) (Shaw et al. 2014)
Industrie du papier	La formation des biofilms réduit la qualité des produits.	(Flemming et al. 2013)
Traitement industriel de l'eau	L'accumulation des biofilms réduit l'efficacité des échanges ioniques et des procédés membranaires utilisés pour le traitement de l'eau	(Rubio et al. 2014)

### **III. Impacts positifs liés à l'adhésion microbienne**

Les biofilms peuvent être désirables. C'est le cas lorsqu'ils sont utilisés dans les réacteurs de bioconversion appelés aussi réacteurs à bactéries fixées (Carpentier. 1999), ou lorsqu'ils interviennent dans certains procédés de fermentation, de filtration et d'épuration (Prigent et al.1999).A plus large échelle, les biofilms sont nécessaires à la survie des bactéries sur la planète et à la continuité de la chaîne alimentaire (Du pont.1997).

### **IV. Moyens de lutte contre la présence de biofilms**

L'élimination complète des biofilms est très difficile et de nouvelles voies de recherche, plus propres pour l'environnement, ont été créées afin d'éviter leur formation. Pour cela, différentes techniques sont utilisées pour empêcher le premier stade de leur formation qui est l'adhésion forte sur la surface.

#### **4.1. Dépôt de couches minces par procédé plasma et la mise au point de surfaces biocides**

Ces dernières décennies, de nombreuses méthodes de préventions et de luttes contre la formation des biofilms ont été mises au point et développées. Au cours de la dernière, un ensemble de procédés, basé sur l'utilisation des technologies plasmas, sont développés de manière exponentielle, et se sont avérés extrêmement intéressants pour modifier d'une part les propriétés de surface des matériaux et les rendre antiadhésives vis-à-vis des contaminations microbiennes et d'autre part pour la mise au point de surfaces biocides, inhibant la survie des microorganismes au contact des matériaux.

La polymérisation par plasma constitue une stratégie efficace pour modifier les surfaces et limiter l'adhésion microbienne, comme le démontrent plusieurs études et synthèses bibliographiques (Popelka et al.2015) ont étudié la polymérisation de polyéthylène par greffage radicalaire de l'acide acrylique(PAA) et l'immobilisation des agents antibactériens appropriés (Le chlorure de benzalkonium et bronopol). En comparaison avec le polyéthylène vierge, une diminution significative de l'adhésion de trois bactéries modèles (*Staphylococcus aureus*, *E.coli*) a été observée, due à une augmentation de l'hydrophilie de surface. Un autre type de précurseur, le silicone ,a été utilisé pour la polymérisation des composites dentaires par (Mandracci et al. 2015) dans un plasma d'oxygène .L'efficacité antiadhésive vis-à-vis de

*Streptococcus mutans* et *Actinomyces naeslundii* a été démontrée. Aussi (Santos et al.2004) ont recouvert des surfaces d'acier inoxydable 316L par une couche mince de carbone à structure diamant. L'efficacité antiadhésive de ces films minces a ensuite été testée par (Rosmaninho et al.2007) vis-à-vis de spores modèles de *Bacillus*.

#### 4.2. Implantation ionique

L'implantation d'ions consiste à introduire, par effet mécanique, des ions présents dans le plasma sous la surface d'un matériau. Cette technique permet la modification des propriétés des matériaux étudiées, lui conférant des caractéristiques anti-adhésives accrues envers les microorganismes.

Ce procédé a été testé par (Braceras et al.2014) pour modifier l'acier inoxydable par implantation d'ion Si. Les résultats montrent que les surfaces implantées, présentant une composition chimique différente déterminée par XPS par rapport à l'acier non traité, ce qui permet une réduction maximale de l'adhésion de *Staphylococcus epidermidis* et *Staphylococcus aureus*.

#### 4.3. Combinaison plasma - huile essentielle ou plasma- vapeur d'huile

En 2014 ,(Matan et al) ont rapporté que, lorsque la surface de la gaine foliaire de l'aréquier (*Areca catechu*), subit un traitement par l'huile essentielle de clou de girofle et de ses principales composantes (Eugénol, Linalool et caryophyllène) ,en combinaison avec un traitement plasma pendant 10 min l'activité antifongique (*Aspergillus Niger*, *Penicillium*., et *Rhizopus sp* )de l'huile de clou de girofle augmente d'une part et d'autre part , la combinaison d'eugénol avec le traitement de plasma diminué de manière significative la concentration minimale inhibitrice d'eugénol de 100µl/ml à 10µl/ml . La mesure de la mouillabilité a révélé que le traitement par plasma froid augmente l'angle de contact des échantillons de la gaine de feuilles traitée à l'huile de clou de girofle ou par son principal composant actif (Eugénol), ce qui aide à protéger les gaine de feuilles contre les moisissures. De même, une autre étude, réalisée par ( Matan et Nisoa. 2014) au cours de cette même année, montrait également que le traitement par plasma d'argon pendant 10 min, en combinaison avec un traitement par les huiles essentielles de girofle, basilic et de citron vert(5 - 20µl/ml) et ses composantes principales (eugénol,β-ocimène, et D-limonène) pour le contrôle de la croissance de certaines souches

bactériennes (*E. coli* , *Salmonella typhimurium* et *Staphylococcus aureus*) sur la surface des œufs de poulets augmente l'activité antibactérienne de ces huiles .Ils ont montré également que sans traitement plasma, les huiles essentielles et tous les composants principaux ne pouvaient pas inhiber la croissance bactérienne aux concentrations étudiées (5-20µl/ml )

L'effet des conditions expérimentales (Temps, Température) d'un traitement plasma avec les composés bioactifs présents dans la vapeur d'huile de margousier ont également été récemment étudié (**Anitha et al. 2015**). Les auteurs de ces travaux rapportent que ce traitement confère un potentiel antimicrobien aux échantillons de tissus de coton étudié.

Les recherches bibliographiques effectuées montrent que les procédés et techniques basés sur les plasmas, constituent une approche pertinente. En effet, en modifiant les propriétés physico-chimiques de surfaces des matériaux traités, ils peuvent à la fois prévenir la formation des biofilms en évitant l'adhésion microbienne sur les surfaces des matériaux nouvellement formés ou bien d'amorcer une phase curative par la décontamination des surfaces déjà colonisées.

# **Chapitre II**

## **Techniques de traitement de surfaces**

### **I. Définition**

L'expression « Traitements de surface » désigne l'ensemble des procédés physiques, chimiques et mécaniques réalisés à la surface des matériaux afin de les adapter à des conditions d'utilisation données.

### **II. Pourquoi un traitement de surface ?**

Les traitements de surface sont la dernière phase dans la création ou la fabrication ou encore de rénovation d'un matériau donné. Ils permettent la modification de la surface d'un substrat déjà existant en lui apportant une ou plusieurs propriétés supplémentaires pour une utilisation ultérieure.

La modification de la surface des matériaux contribue grandement à la prolongation de leur durée de vie, notamment dans le cas des matériaux de construction tel que le bois. Il est également utilisé à des fins décoratives ou pour renforcer leur dureté et leur résistance aux dégâts et à l'usure et empêcher leur corrosion ; ils servent également en tant que base pour améliorer l'adhésion d'autres traitements tels que des peintures.

Usuellement, les traitements de surface peuvent être divisé en deux catégories : les traitements par voie humide et ceux par voie sèche.

### **III. Différents techniques de traitements de surfaces**

#### **3.1. Techniques de traitement par voie humide**

##### **3.1.1. Procédés électrolytiques**

Les traitements électrolytiques permettent de déposer sur un grand nombre de matériaux de faibles couches de revêtements métalliques (Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Sn, Au, Ag, Pd, Pt,...) aux propriétés particulières (résistance à la corrosion, aspect décoratif) et technique (dureté, conductibilité).

## **Principe**

Cette technique utilise le principe d'oxydoréduction. Les dépôts métalliques sont réalisés à partir d'une solution contenant du métal à déposer sous forme de sels dissous ou d'anodes solubles ainsi que des agents complexant, des agents tampons ou des additifs organiques visant à améliorer les qualités (brillance, dureté, adhérence...) du revêtement réalisé. Un courant électrique réduit le métal d'apport à la surface d'un substrat. (Serres.2010)

### **3.1.2. Procédés chimiques**

#### **Principe**

La réalisation d'un dépôt chimique consiste à réduire les ions en solution du métal à déposer sans apport de courant, soit par réaction avec la surface du matériau à recouvrir, soit par réaction spontanée avec un autre corps présent dans la solution. Les procédés chimiques présentent généralement une vitesse de dépôt plus faible que les traitements électrolytiques. (Galerie et al.2002)

### **3.1.3. Procédé par immersion**

C'est un procédé classique qui consiste à plonger le métal à recouvrir dans un bain fondu du métal de revêtement. L'épaisseur du dépôt obtenu est en général fonction de la durée d'immersion. (Bernard et al. 1991)

## **3.2. Techniques de traitement par voie sèche (TSVS)**

### **3.2.1 .Projection thermique**

#### **Principe**

La matière, sous forme de poudre, fil, ou cordon, est fondue au chalumeau ou à l'arc et projetée sur le substrat au moyen d'un pistolet. Les gouttelettes se déposent à la surface et se solidifient. C'est l'accumulation des particules sur le substrat qui crée le revêtement. Les épaisseurs déposées vont de quelques dizaines de micromètres à quelque millimètre avec une porosité résiduelle de 1 à 10%. (Dong.2013)

#### **a. Dépôt physique en phase vapeur (PVD : Physical Vapour Deposition)**



Les dépôts physiques sous vide en phase vapeur regroupent différentes techniques (pulvérisation, évaporation, pulvérisation cathodique) permettant de réaliser sous faible pression et à basse température toutes sortes de revêtements (métaux, alliages, céramiques, ...).

### **Principe**

Ce type de revêtement est basé sur le principe de l'utilisation des vapeurs en configuration avec des procédés physiques (plasma, laser...), permettant la pulvérisation de la surface sous basse pression ( $10^{-2}$  à  $10^{-4}$  mbar), afin de réaliser un dépôt de couches minces. La production de la phase vapeur est assurée par deux mécanismes différents en fonction de la technique d'évaporation de la cible : la pulvérisation cathodique et la vaporisation. (Will et al.2000;Tlili.2011)

- **Pulvérisation cathodique**

Les atomes du matériau à déposer sont expulsés d'une cible par un bombardement de particules énergétiques qui sont généralement des ions positifs accélérés d'un plasma gazeux (par exemple des ions argon). La cible est dans ce cas portée à un potentiel négatif (la cathode), d'où son nom de pulvérisation cathodique. (Tlili . 2011;Constantin.2012)

- **Evaporation**

La vaporisation des substances à déposer peut être obtenue à partir d'un matériau que l'on peut chauffer par effet Joule, induction, faisceau laser, arc électrique, faisceau d'électrons, plasma, électrodes, rayonnement, résistance, ou décharge au gaz.(Taniguchi et al.2003)

### **b. Dépôt Chimique en phase Vapeur (CVD : Chemical Vapour Deposition)**

Le procédé de dépôt chimique en phase vapeur est basé sur une réaction chimique durant laquelle un composé volatil du matériau à déposer se réduit en présence d'un réducteur comme par exemple l'hydrogène ou le méthane à la surface du substrat pour former le dépôt, contrairement à la PVD, le procédé de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) n'utilise pas une source de vapeur solide mais un précurseur gazeux.(Will et al.2000;Tlili.2011)

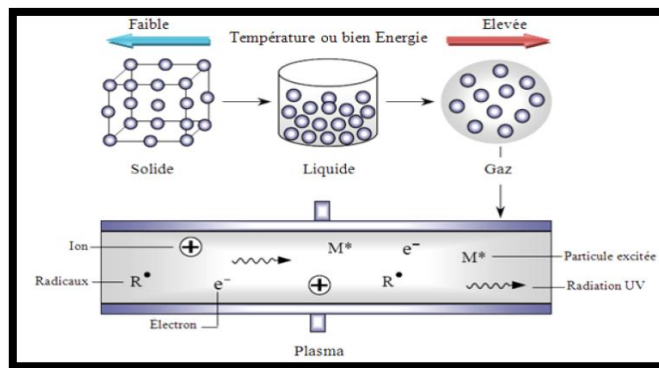
### **c. Plasma**

#### **1. Définition**

Le terme plasma vient du grec et désigne "matière informe". Il s'agit du quatrième état de la matière faisant suite aux trois états classiques : solide, liquide et gaz, découvert par le physicien

Américain Irving Langmuir en 1928. Il l'appelle « plasma » en raison de sa similitude avec le plasma sanguin. La définition fut plus tard étendue pour décrire un milieu gazeux dans lequel on trouve des électrons, des ions et des particules neutres (à l'état fondamental ou excité) et des photons, telle que cet ensemble soit globalement électriquement neutre. (Tendero et al.2006; Bogaerts et al.2002).

De façon générale, 99% de l'univers est constitué par de la matière à l'état plasma. Les plasmas peuvent être naturels (aurores boréales, étoiles, éclairs...) ou artificiels, créés par un champ électrique et/ou magnétique (plasma basse pression, réacteur de fusion nucléaire).



**Figure.2** : Représentation schématique des quatre états de la matière (Abd Jelil.2011)

## 2. Grandeurs caractéristiques de plasma

Tous les plasmas n'ont pas les mêmes caractéristiques et peuvent être ainsi classifiés en fonction de certains paramètres précis. Ces paramètres sont essentiellement :

- **Libre parcours moyen**

Le libre parcours moyen  $\lambda$  correspond à la distance moyenne parcourue par une particule chargée entre deux collisions. Il dépend de la vitesse des particules, ainsi que de la probabilité de collision. (Labergue.2005)

- **Température électronique**

$T_e$  est la température électronique qui correspond à la température absolue en Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ) des électrons. La température électronique est souvent considérée la plus importante pour déterminer et démontrer les phénomènes dans le plasma puisqu'ils sont les agents les plus actifs pour l'ionisation du gaz et la création de radicaux. En général,  $T_e \gg T_i > T_n$ , où  $T_e$  est la température

électronique,  $T_i$  la température ionique et  $T_n$  la température des neutres, proche de la température ambiante.(Labergue.2005)

- **Longueur de Debye**

La longueur de Debye  $\lambda_D$  indique la distance à partir de laquelle le champ électrique Coulombien issue d'une particule chargée est neutralisé par un ensemble de particules de signe opposées dans le volume environnant. (Youssef.2007)

- **Taux d'ionisation**

Le taux d'ionisations  $\tau_i$  représente le rapport du nombre d'électrons libre  $n_e$  sur le nombre de particules totales  $n_e + N$ , où  $N$  est le nombre de particules neutres par unité de volume.(SARRA-bournet.2007)

### **3. Classification**

A partir des paramètres mentionnés ci-dessus, Nous pouvons distinguer deux familles de plasmas (Schutze et al. 1998;Tendero et al.2006)

#### **3.1. Plasmas chauds**

Les températures sont supérieures à  $10^6$  K. L'exemple le plus évident de source de plasma chaud est le soleil. Les plasmas chauds sont également présents sur terre, ils sont largement utilisés pour la soudure, la découpe et dans les analyses chimiques (spectroscopie d'émission atomique par plasma à couplage inductif), etc.(Vandencastele.2008)

#### **3.2 Plasmas froids**

##### **3.2.1. Plasmas thermiques**

Les températures de fonctionnement sont supérieures à 3000 K.Ces plasmas froids thermiques sont généralement à l'équilibre thermodynamique local. Elles sont utilisées dans l'industrie pour les traitements de surface, la dépollution et la génération d'ozone. (Labergue.2005)

##### **3.2.2. Plasmas non thermiques**

Les ions et les neutres restent à des températures inférieures à 1000 K, alors que les électrons sont à des températures élevées (applications au traitement de surface, à l'élaboration de matériaux nouveaux, à la dépollution à la génération d'Ozone, à la chimie assistée par plasma,...).Ces plasmas sont générés dans les laboratoires, par l'utilisation d'une haute tension

entre deux électrodes. On applique préférentiellement le terme de « décharge électrique » pour les nommer.(Labergue.2005)

### **a. Plasmas atmosphériques**

Le plasma à pression atmosphérique peut être généré par deux principales technologies : Les décharges luminescentes et les décharges électriques.

#### **1. Décharges électriques**

Les décharges électriques sont des plasmas froids, générées par une différence de potentiel électrique. Parmi les décharges électriques à pression atmosphérique, on trouve la décharge couronne et la décharge à barrière diélectrique. (Labergue 2005)

- **Décharge couronne**

La décharge couronne est une décharge hors équilibre thermodynamique non homogène , générée à pression atmosphérique dans un système d'électrodes fortement dissymétriques.Le plasma forme une couronne lumineuse , à l'origine du nom «couronne».(Schutze et al.1998 ; Tendero et al.2006; Jaworek et al.2014)

- **Décharge à barrière diélectrique**

Les décharges à barrière diélectrique ( DBD) ou décharge silencieuses. Dans ce type de décharges, un diélectrique couvre l'une des électrodes. Cet isolant permet de limiter les arcs et rend donc la décharge plus stable. (Bouzidi.2014)

### **b. Plasmas à basse pression**

Les difficultés rencontrées au cours des vingt dernières années, pour contrôler le traitement de surface par plasma à la pression atmosphérique ont mené les chercheurs à développer des procédés fonctionnant à basse pression.

Ces plasmas sont générés dans des chambres fermées sous vide ( $10^{-3}$  à barre  $10^{-9}$ ).dans lesquelles on injecte un gaz à une pression comprise entre 0.01 et 1 mbar. Par l'apport d'énergie sous la forme d'un champ électrique dont la fréquence peut varier du continu jusqu'aux fréquences micro-ondes. Ce champ permet d'accélérer les électrons jusqu'à atteindre une énergie suffisante permettant d'ioniser le gaz.Des pompes puissantes sont nécessaires pour l'évacuation de la chambre. Le plasma à basse pression n'est pas intégrable en ligne.A basse pression, la technique du plasma se base sur des générateurs Radiofréquence "RF" (13.56 MHz à 40 MHz) ou générateurs micro-ondes (2,45 GHz).(Cédric Amorosi. 2012)

### **1. Décharges luminescentes**

Une décharge luminescente est un plasma obtenue le plus souvent à basse pression (moins de 10 mbar), entre deux électrodes planes. Les électrons produits dans ce type de décharge sont fortement énergétiques. Les atomes neutres excités ainsi que les molécules génèrent une luminescence typique.(Vandencastele.2008)

### **2. Décharges micro-ondes**

Les systèmes micro-ondes fonctionnent tous selon le même principe. Ils ne comportent pas d'électrodes. Ces systèmes comportent généralement un générateur micro-onde (alimentation, tête magnétron et circulateur pour protéger le magnétron de la puissance réfléchie) ,un matériel micro-onde (guides d'onde, système d'accord), un système d'amorçage de la décharge et des injections de gaz. Les micro-décharges sont guidées le long du dispositif et transmettent leur énergie aux électrons du gaz. Ceci donne lieu à des collisions inélastiques excitatrices voire ionisantes entre les électrons et les lourds. A ce stade, le gaz est partiellement ionisé et passe à l'état plasma(Tendero.2005). Le plasma obtenu est caractérisé par une bonne uniformité en volume et en surface.

### **3. Décharges radiofréquence**

Dans les plasmas RF, les particules chargées se déplacent de manière différente selon leur masse. Les électrons étant beaucoup plus légers que les ions, ils sont donc plus fortement accélérés que les ions par le champ électrique. De ce fait, l'énergie transférée aux électrons est plus importante que celle transférée aux ions. Ainsi que la tension appliquée aux électrodes n'est plus continue, mais alternative et la fréquence utilisée est de 13,56 MHz.(Debrabandere.2011)

# Chapitre III

## Traitement de surfaces par plasma

### I. Introduction

Les procédés plasma permettent à la fois de modifier de façon spécifique et d'apporter toute une série de nouvelles propriétés aux matériaux tout en gardant les caractéristiques intrinsèques. Récemment les technologies plasma trouvent leur application dans de nombreux domaines. Ceci est sans doute dû à leur bon rendement énergétique, et à l'apparente simplicité de leur utilisation : traitements et revêtements de surfaces, dépollution, traitements d'effluents gazeux.(Tendero. 2005). Elles sont applicables à tout type de matériau (métaux, polymères, céramiques) et à des géométries complexes .

### II. Interactions plasma-surface

#### 2.1. Traitement préventif

##### a.Effets physico-chimiques

Les traitements plasmas, à basse pression ou à pression atmosphérique, sont largement utilisés dans la modification de surface des matériaux.. Il s'agit d'une réaction entre les éléments chimiques qui constituent le gaz ionisé du plasma et la surface de l'échantillon. Ces réactions aboutissent en général au greffage de nouvelles fonctions chimiques à la surface des matériaux. Par exemple, les traitements plasmas réalisés avec des gaz tels que O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O permettraient d'améliorer la mouillabilité de toute une série de supports en donnant naissance à des groupements fonctionnels oxygénés (groupements hydroxyle, peroxyde, acide carbonyle, carboxyle, peroxyde, hydroperoxyde, carbonate,...).(Wróbel et al .1978 ; Asfardjani et al.1991;Kan et al 1997 ; Öktem et al.2000 ; Wilson et al.2001;Höcker et al. 2002 ; Rehn & Viöl, 2003;Vatuna et al.2004 ; Morent et al.2007; Leroux et al. 2008; Busnel et al.2010;Encinas et al.2014; Bónová et al.2015).Les plasmas de gaz rares (He, Ne, Ar...) sont également utilisés (Sabharwal et al. 1993 ;Lai et al.2006;Morent et al.2007;Van Deynse et al. 2015). L'augmentation de l'hydrophilie a été démontrée par (De Geyte.2008). L'observation de la diminution de l'angle de contact est due à l'incorporation des fonctions oxygénées comme C–O et O–C=O. Aussi Les plasmas azotés (N<sub>2</sub>,

NH<sub>3</sub>...) donnent lieu à la formation de groupements hydrophiles, en particulier de groupements amine (-NH, -NH<sub>2</sub>) voire de groupements amide (-N-C=O). A l'inverse des plasmas oxygénés ou azotés (Brandenburg et al. 2007 ; Busnel et al. 2010 ; Wang et al. 2014). Les plasmas fluorés (type F<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>, CHF<sub>3</sub>, NF<sub>3</sub>, SiF<sub>4</sub>...) sont utilisés pour convertir des surfaces hydrophiles en surfaces hydrophobes (Höcker et al. 2002 ; Magalhães et al. 2002 ; Podgorski et al. 2002 ; Taylor et al. 2015)

**Tableau .2. : Revue des différents travaux concernant la physico-chimie des surfaces traitées avec différentes sources de plasma**

Type de décharge	Temps	Plasma	Effet sur la physico-chimie	Matériaux	Référence
<b>Décharge luminescent</b>	1min	O <sub>2</sub> , Argon, N <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>	Hydrophilie accrue	PTEF	(Wróbel et al. 1978)
	6s	Argon		Polyéthylène	(Van Deynse et al. 2015)
<b>DBD</b>	-	HO <sub>2</sub> Air	PS (NT) : $\theta_w=68^\circ$ PS (T) : $\theta_w=12-14^\circ$	PS PEI	(Asfardjani, et al. 1991)
	5min	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H/N <sub>2</sub>		Laine	(Kan et al. 1997)
	10min	HMDS	Bois (NT): $\theta_w=130^\circ$ Bois (T) : $\theta_w=130^\circ$	Bois	(Agnes et al. 1999)
	90min	Acide acrylique, eau, air, argon, O <sub>2</sub>	Hydrophilie accrue	PET	(Öktem et al. 2000)
	60s	Air Argon	Cotton (NT): $\theta_w=107,83^\circ$ Cotton (T) : $\theta_w=0^\circ$	Cotton	(Karahana et al. 2008)
	1-60s	O <sub>2</sub> Air	Aluminum (NT) : $\theta_w = 93,04^\circ$ Aluminum(T) : $\theta_w = 56,8^\circ$	Aluminum	(Bónová et al. 2015)
<b>Décharge couronne</b>	-	O <sub>2</sub>	PP(NT): $\theta_w=90^\circ$ PP(T) : $\theta_w=55^\circ$	PP	(Höcker et al. 2002)
	5min	CF <sub>4</sub>	P(NT): $\theta_w=116^\circ$ P(T) : $\theta_w=0^\circ$	Papier	(Yue et al. 2015)
	5min	O <sub>2</sub>	Bois (NT): $\theta_w=118^\circ$ Bois (T) : $\theta_w=10^\circ$	Bois	(Podgorski et al., 2000)

<b>MW</b>	15min	Fluorine (C3F6, AC8F17) Silicone (HMDSO,	Bois (NT) : $\theta_w=10^\circ$ Bois (T) : $\theta_w=76^\circ-120^\circ$	Bois	(Podgorski et al. 2002)
		Argon	Aluminium (NT) : $\theta_w=72,35^\circ$ Aluminium (T) : $\theta_w=36,47^\circ$	Aluminium	(Shin et al., 2007)
	120s	Air	Aluminium (NT) : $\theta_w=48^\circ$ Aluminium (T) : $\theta_w=17^\circ$	Aluminium	(Polini et al.2003)
	90s	He/O <sub>2</sub>	Hydrophilie accrue	Polyster	(Shin et al. 2006)
<b>DBD</b>	30min	Acétylène 1-Butène Acétate	Bois (NT): - } Acétylène Bois (T) : $\theta_w=114^\circ$  Bois (NT) : - } 1-Butène Bois (T) : $\theta_w=140^\circ$  Bois (NT) : - } Acétate Bois (T) : $\theta_w=86^\circ$	Bois	(Magalhães et al.2002)
	30s	O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>			(Vatuna et al .2004)
	1-20s	He, N, Ar et Air He, N, Ar, Air, Méthane et Acétylène	Surface hydrophile Surface hydrophobe	Bois	(Rehn et al.2003)
	180min	SF <sub>6</sub>	Laine (NT) : - Laine (T) : $\theta_w=130^\circ-140^\circ$ Laine (NT) : $\theta_w=132,4^\circ$ Laine (T) : $\theta_w=0^\circ$	Laine	(Chaivan et al.2005) (Cai et Qiu .2006)
	2ms	O <sub>2</sub>	Augmentation de la mouillabilité	Composite bois plastique	(Wolkenhauer et al. 2007)
		Ar, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	Hydrophilie accrue	Bois	(Busnel et al. 2010)
	60s	O <sub>2</sub>	Amélioration de la Mouillabilité des faces internes des feuilles	Mâche	(Grzegorz et al.2010)
	-	Air	Augmentation de la mouillabilité	Composite Epoxy polyester	(Encinas et al.2014)
	<b>RF</b>	5min	CF <sub>4</sub>	PLA (Nt) : $\theta_w=69^\circ$ PLA (T) : $\theta_w=86^\circ$	Poly (Acide Lactique)
2min		CF <sub>4</sub>	PET (Nt) : $\theta_w=65^\circ$ PET (T) : $\theta_w=145^\circ$	Polyéthylènetéréph alate (PET)	(Tarrade et al. 2014)
50s		CF <sub>4</sub>	PET (Nt) : $\theta_w=36,20^\circ$ PET (T) : $\theta_w=120,56^\circ$	Papier	(Taylor et al. 2015)



## b. anti-adhésifs

Le passage des microorganismes de l'état planctonique à l'état sessile, phase précoce de la formation d'un biofilm, est un processus commun qu'adoptent la plupart des microorganismes sur la majorité des matériaux en présence d'humidité. Cette phase bien connue, appelée « phase d'adhésion microbienne » dépend de nombreux facteurs liés aussi bien au milieu environnant, aux microorganismes ainsi qu'aux matériaux solides servant de supports d'attache. Dans la plupart des cas, il n'est pas possible d'agir sur les caractéristiques du milieu suspendant (fluides corporels, matrice alimentaire, eaux usées) ou sur les propriétés de surface des nombreux microorganismes présents. Par conséquent, la stratégie la plus couramment employée pour prévenir la colonisation microbienne consiste à élaborer des surfaces antiadhésives, c'est-à-dire à modifier les propriétés de surface du matériau (rugosité, énergie de surface, charge, nature chimique) pour empêcher les interactions spécifiques et non-spécifiques entre microorganismes et support. C'est dans cette optique que de nombreux travaux sont consacrés à l'étude de diverses méthodologies de traitement des surfaces de matériaux. Et notamment parmi celles-ci, celles qui reposent sur les technologies plasmas sont employées comme outil annexe dans les étapes intermédiaires, pour activer ou fonctionnaliser les surfaces des matériaux, ou encore pour renforcer le dépôt réalisé par d'autres méthodes de traitement de surfaces. Plusieurs études ont rapporté que les traitements par plasmas permettent d'appliquer des revêtements sur les surfaces des matériaux, leurs conférant ainsi un caractère antiadhésif.

**Tableau. 3. : Revue des différents travaux concernant l'activité adhésive des surfaces traitées avec différentes sources de plasma**

Type de décharge	Paramètres	Plasma	Matériaux	MO	Référence
-	2,45GHz 160mbar 15s-10min	Air	Polyuréthane	<i>Escherichia coli</i>	(Gray et al.2003)
<b>Décharge luminescent</b>	30 kV 6100A	H <sub>2</sub> O	Tissu de polypropylène	<i>Staphylococcus aureus</i> <i>Escherichia coli</i>	(Neagoe.2011)
<b>Décharge radiofréquence</b>	50W 70 W 70W 130W 5min	Argon Argon / O <sub>2</sub> Argon /SF <sub>6</sub> Air	Polyéthylène	<i>Staphylococcus aureus</i> <i>Escherichia coli</i>	(Andrade et al.2010)

	0-40W 50-600KHz 10KV	Argon	La gaine foliaire du palmier à bétel (Areca catechu )	<i>Aspergillus niger</i> <i>Penicillium sp</i> <i>Rhizopus sp</i>	(Matan et al. 2014)
	20 - 40 W 25min	Argon	Barres céréales à base du riz	<i>Aspergillusflavus</i>	(Suhem et al. 2013)
	20 -80 W 13,6 MHz 0,1 mbar 10 min	Argon	Acier inoxydable	<i>Entérobacter</i> <i>Sakazakii</i>	(Yasin et al. 2012)
<b>DBD</b>	200w 5KHz 0,5mm 15s	Air	Polyéthylène	<i>Escherichia coli</i> <i>Staphylococcus aureus</i>	(Popelka et al. 2012)
	75Pa 27,12 MHz 200W	CO <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Polyester	<i>Escherichia coli</i> <i>S aureus</i> <i>Candida glabrata</i>	(Tkavc et al.2014)
	13,65MHz 300s -125W 60s -75W	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	Polystyrène	<i>Klebsiella pneumoniae</i> <i>Serratia marcescens</i> <i>Enterobacter cloacae</i> <i>Staphylococcus aureus</i>	(Trentin et al.2014)
	-	O <sub>2</sub> Argon CO <sub>2</sub>	Matériaux dentaire	<i>Streptococcus mutans</i> <i>Streptococcus mitis</i>	(Mandracci et al.2015)
	15 kHz 10 kV 15 s	Air	Polyéthylène	<i>Staphylococcus aureus</i>	( Popelka et al.2015)

## 2.2. Traitement curatif

Le développement des biofilms suit un processus bien connu et s'opère selon les étapes décrites telles que mentionnées précédemment ; commençant par l'adhésion et la multiplication des microorganismes (bactéries, champignons, algues, protozoaires) sur les surfaces, naturelles ou artificielles, exposées à des environnements humides non stériles. De nombreuses méthodes de luttés contre les biofilms sont proposées dans la littérature et bien qu'elles puissent être physiques, chimique ou biologiques ou encore différentes selon le matériau à traiter, elles s'inscrivent néanmoins dans deux types de stratégies : préventives ou curatives une fois le matériau entamé. Cette dernière stratégie est surtout basée sur l'application de procédures de nettoyage/désinfection ou l'utilisation massive d'agents antibiotiques, s'avèrent souvent inefficaces du fait de la résistance accrue des microorganismes sous forme de biofilms. Au cours de la dernière décennie, de nombreux travaux portant sur le traitement de surfaces par plasma ont été publiés (Vassal et al.1998 ;Kelly-Wintenberg et al.1999; Gadri et al.2000; Shin et al.2003;Lai et

al.2005; Laroussi et al.2006 ; Fridman et al.2007; Cramariuc et al.2008; Cooper et al.2009;Bussiahn et al.2010;Marchal et al.2012 ;Yong Hae et al.2015 ;Anser et al. 2014;Sakr te al. 2015Lee et al. 2015), Ont montré de très grandes potentialités de différents décharges étudiés comme des procédés de décontamination. Les travaux concernent en grande partie l'étude de « l'effet plasma » sur les bactéries telles que : *Escherichia. coli*, *Bacillus subtilis* ou *Pseudomonas aeruginosa* par exemple mais peu de publications sur le traitement de microorganismes eucaryotes tels que les champignons et moisissures ont pu être trouvées (Laguardia et al.2005 ; Selcuk et al.2008; Basaran et al. 2008 ; Maisch et al.2012).

**Tableau .4. : Assortiment des résultats d'inactivation obtenus récemment avec différents sources de plasma.**

Type de décharge	Temps	Gaz	MO	N <sub>0</sub> (UFC)	Matériaux	Référence
Décharge corona	300s	O <sub>3</sub>	Norwalk Virus	-	Liquide	(Shin & Sobsey 2003)
	300s	O <sub>3</sub>	Poliovirus	-	Liquide	
	300s	O <sub>3</sub>	Coliphage MS2	-	Liquide	
	2-30min	Air	<i>Weissela confusa</i>	1*10 <sup>5</sup>	Milieu de culture MRS	(Marchal et al. 2012)
	300s	Air	<i>Aeromonas</i>	1*10 <sup>5</sup>	-	(Cramariuc et al. 2008)
	1200s	Argon	<i>Escherichia. coli</i>	-	-	(Bussiahn et al. 2010)
	160s		<i>Escherichia coli</i>		Agar humide	
MW	120s	Air	<i>Bcillus . atrophaeus</i>	106	Verre sec	(Ehlbeck et al. 2010)
	10s	Air	<i>Bacillus cereus</i>	106	Verre sec	(Lai et al.2005)
	60s	Argon	<i>Escherichia. Coli</i>	105	Membrane filtrante	(Sato et al.2007)
DBD	24s	Air	<i>Escherichia. coli</i>	8*10 <sup>6</sup>	PP sec	(Gadri et al. 2000)
	22s	Air	<i>Staphylococcus aureus</i>	1*10 <sup>7</sup>	PP sec	
	240s	Air	<i>Bacillus. subtilis</i>	1*10 <sup>6</sup>	Papier sec	
	120s	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	<i>Bacillus. atrophaeuss</i>	1*10 <sup>6</sup>	Acier sec	(Venezia, 2008)
	300s	Air	<i>Staphylococcus. atrophaeuss</i>	1*10 <sup>5</sup>	PE sec	(Ehlbeck et al. 2010)
	600s	Air	<i>atrophaeuss</i>	>10 <sup>6</sup>	Papier sec	(Schwabedissen, 2007)
	900s	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	<i>Bacillus. subtilis</i> <i>G. stearthermophilus</i>	3*10 <sup>6</sup>	Tyvek, dry	(Eto, 2008)
	30s	Air	<i>Staphylococcus aureus</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1*10 <sup>7</sup>	Membrane d'acétate de cellulose (LB : liquide)	(Kvam et al.2012)
	240s	NO, N <sub>2</sub>	<i>Candida albicans</i> <i>Adénovirus</i>	5*10 <sup>8</sup>	Plaques à 96 puits contenant des suspensions virales	(Zimmermann et al. 2011)
	5min	N <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> O He/O <sub>2</sub>	<i>Escherchia. faecalis</i> <i>Staphylococcus aureus</i>	-	Milieu de culture	(Cao et al. 2011)

30s	Air	<i>Escherichia. coli</i>	1*10 <sup>7</sup>	PP sec	(Kelly et al .1999)
30s	Air	<i>Staphylococcus aureus</i>	1*10 <sup>7</sup>	PPsec	
120s	Air	<i>Bacillus subtilis</i>	3*10 <sup>4</sup>	Vaisseaux spatiales	(Cooper et al.2009)
340s	Air	<i>Linnocua</i>	5*10 <sup>7</sup>	Acier sec	(Leipold. et al.2009)
300s	Air	<i>Escherichia. coli</i>	1*10 <sup>7</sup>	Liquide physiologique saline	(Oehmigen et al. 2010)
600s	Argon/F	<i>Bacillus atrophoeus</i>	1*10 <sup>6</sup>	PTEF sec	(Ehlbeck et al. 2010)
10s	Air	Human skin floraE.coli	1*10 <sup>7</sup>	Agar humide	(Fridman et al. 2007)
40s	Argon	<i>Streptomyce griseus</i>	2,5*10 <sup>6</sup>		(Weng et al. 2009)
4,8,10min	He/O <sub>2</sub> -O <sub>3</sub>	<i>Streptomycesampsonii</i> <i>Streptomycegriseoviridis</i> <i>Streptomycealbus</i> <i>Streptomyceflvtsstmus</i> <i>Streptomyceexfoltatus</i> <i>Streptomycegriseoflavus</i>	0 2*10 <sup>1</sup> 0 0 0 0	Icônes comptes	(Sakr et al. 2015)
20s -10min	Air,NO <sub>2</sub> ,NO,O <sup>3</sup> Air ,SF <sub>6</sub>	<i>Candida albicans</i> <i>Aspergillus parasiticus</i> <i>Escherchia coli</i>	1*10 <sup>7</sup> -	Suspensions fongiques Noix	(Maisc 2012) (Basara et al.2008)
60s , 45 s , 7 min	Air	<i>Escherichia coli</i> <i>Salmonella typhimurium</i> <i>Listeria .monocytogenes</i>	-	Fromage en tranches Milieu de culture	(Yong Hae et al.2015)
0 à 60 min	Air	<i>Rhizobium gallicum</i> )	-	Microplaques en polystyrène	(Brelles-mariño 2012)
30min	Air	<i>DeinococcusRadioduran</i>	-	Acier inoxydable	(Cooper et al., 2009)
60s, 120s	Air	<i>Bacillus stratosphericus</i>	-	Liquide (LB)	Cooper et al.2010)
90s	Air	<i>Staphylococcus aureus</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Acinetobacter baumannii</i>	- - -	Tables en bois, Matelas, Acier inoxydable, Polypropylène	(Cahill et al. 2014)
420s	Argon	<i>Bacillus. Atrophaeus</i>	2*10 <sup>6</sup>	Plaque de PE sec	(Brandenburg et al. 2007)
240s	Argon	<i>Escherichia. coli</i>	6*10 <sup>5</sup>	Plaque de PE sec	
120s	Argon	<i>Missa</i>	7*10 <sup>2</sup>	Agar humide	(Daeschlein et al. 2010)
120s	Argon	<i>Pseudomonas .aeruginosa</i>	8*10 <sup>2</sup>	Agar humide	
120s	Argon	<i>Candida .albicans</i>	1*10 <sup>2</sup>	Agar humide	
420s	Argon	<i>Bacillus .atrophaeus</i>	4*10 <sup>6</sup>	Plaque de PE	(Weltmann et al., 2008)
120s	Argon	<i>Escherichia coli</i>	4*10 <sup>5</sup>	Plaque de PE	(Lim et al.2007)
30s	Ar/O <sub>2</sub>	<i>Bacillus .atrophaeus</i>	2,2*10 <sup>6</sup>	Verre sec	
180s	He/O <sub>2</sub>	<i>Bacillus .atrophaeus</i>	2,2*10 <sup>6</sup>	Verre sec	
30s	He/O <sub>2</sub>	<i>Escherichia. Coli</i>	10 <sup>6</sup>	Agar humide	(Laroussi et al .2006)
10s	He	<i>Escherichia. Coli</i>	10 <sup>7</sup>	Agar humide	(Sladek et Stoffels 2005)
60s	He/O <sub>2</sub>	<i>Escherichia. Coli</i>	-	Verre sec	(Kim et al.2009)
180s	He	<i>Escherichia. coli</i>	1*10 <sup>7</sup>	Eau distillée	(Ikawa et al. 2010)
30s	He/O <sub>2</sub>	<i>Bacillus .globigu</i>	1*10 <sup>7</sup>	Verre sec	(Herrman et al.1999)



# Chapitre IV

## Traitement du bois par plasma

Ce chapitre est dédié à une brève présentation sur le bois et son traitement par le plasma.

### I. Généralités sur le matériau bois

Le bois est un matériau très complexe, et nous proposons, dans les paragraphes ci-après, de décrire sa structure et sa composition dans le but d'expliquer ultérieurement les mécanismes d'altération auxquels il est confronté.

Nous présenterons dans un premier temps la composition chimique du bois. Nous détaillerons ensuite chaque composant. Cette description est importante car elle permet de comprendre l'organisation de ce matériau complexe et l'origine de ses propriétés.

#### 1.1. Composition chimique

La composition chimique du bois est complexe et présente une grande hétérogénéité. Les constituants peuvent être subdivisés en deux groupes : les substances macromoléculaires et les substances de faible masse molaire

##### a. Substances macromoléculaires

**Cellulose**, est un polymère du glucose. Elle se trouve à 70 ou 80 % sous forme cristalline dans le bois.

**Hémicelluloses**, qui sont aussi des polysaccharides. Ce sont les constituants du bois les plus hydrophiles, qui peuvent gonfler de manière importante en fixant des molécules d'eau.

**Lignine**, qui est un polymère amorphe de nature phénolique qui rigidifie la paroi cellulaire.

##### b. Substances de faible masse moléculaire

**Extractibles** (molécules minérales ou organiques de faible masse moléculaire) sont généralement contenus dans les lumens des cellules.

**Cendres** ou proprement dite les matières carbonées résiduelles Elles représentent le contenu inorganique et minéral et ne sont présentes qu'en faible proportion dans la paroi cellulaire (de 0.5

à 1%). Les éléments que l'on retrouve le plus fréquemment sont le manganèse, le calcium, le potassium et le sodium.

## **1.2. Dégradation de bois par les microorganismes**

De par sa nature organique, il s'agit d'un matériau naturel, biodégradable c.à.d. susceptible d'être dégradé par des divers agents biologiques : bactéries, champignons (moisissures) et insectes. Même si les insectes peuvent causer des dégâts considérables, ce sont les champignons qui sont les plus fréquemment rencontrés. Il existe de nombreuses espèces de champignons capables de dégrader le bois. Ils sont divisés selon le type de pourriture qu'ils provoquent sur le bois : cubique, fibreuse et molle.

### **a. Pourritures cubiques**

Les champignons de pourriture cubique brune sont des Basidiomycètes et décomposent essentiellement la cellulose et les hémicelluloses. Parmi ces champignons, le plus répandu est *Serpula lacrymans*, mieux connu sous le nom de Mérule.

### **b. Pourritures fibreuses blanche**

Les champignons de pourriture fibreuse blanche dégradent simultanément la lignine et la cellulose. Les champignons responsables de ce type de pourriture appartiennent également aux Basidiomycètes (*Colorius versicolor* par exemple).

### **c. Pourritures molle**

La pourriture molle est le résultat d'une attaque par des champignons appartenant à la classe des Ascomycètes (champignons inférieurs) dont le plus répandu est *Chaetonium globosum*. Ils dégradent la cellulose et les hémicelluloses.

## **II. Traitement du bois par plasma**

Contrairement aux études concernant le traitement de surface par plasma de polymères synthétiques, les travaux sur le traitement de polymères naturels comme le bois sont peu abondants. Les articles existants à ce sujet traitent principalement des modifications de mouillabilité du bois.

(Podgorski et al. 2000) ont montré que des traitements par plasma de type décharges couronne à basse pression sous, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar, Ar/O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>/O<sub>2</sub> permettent d'augmenter l'hydrophilie du bois. En revanche, l'utilisation de l'ammoniaque seul conduit à une diminution de la mouillabilité.

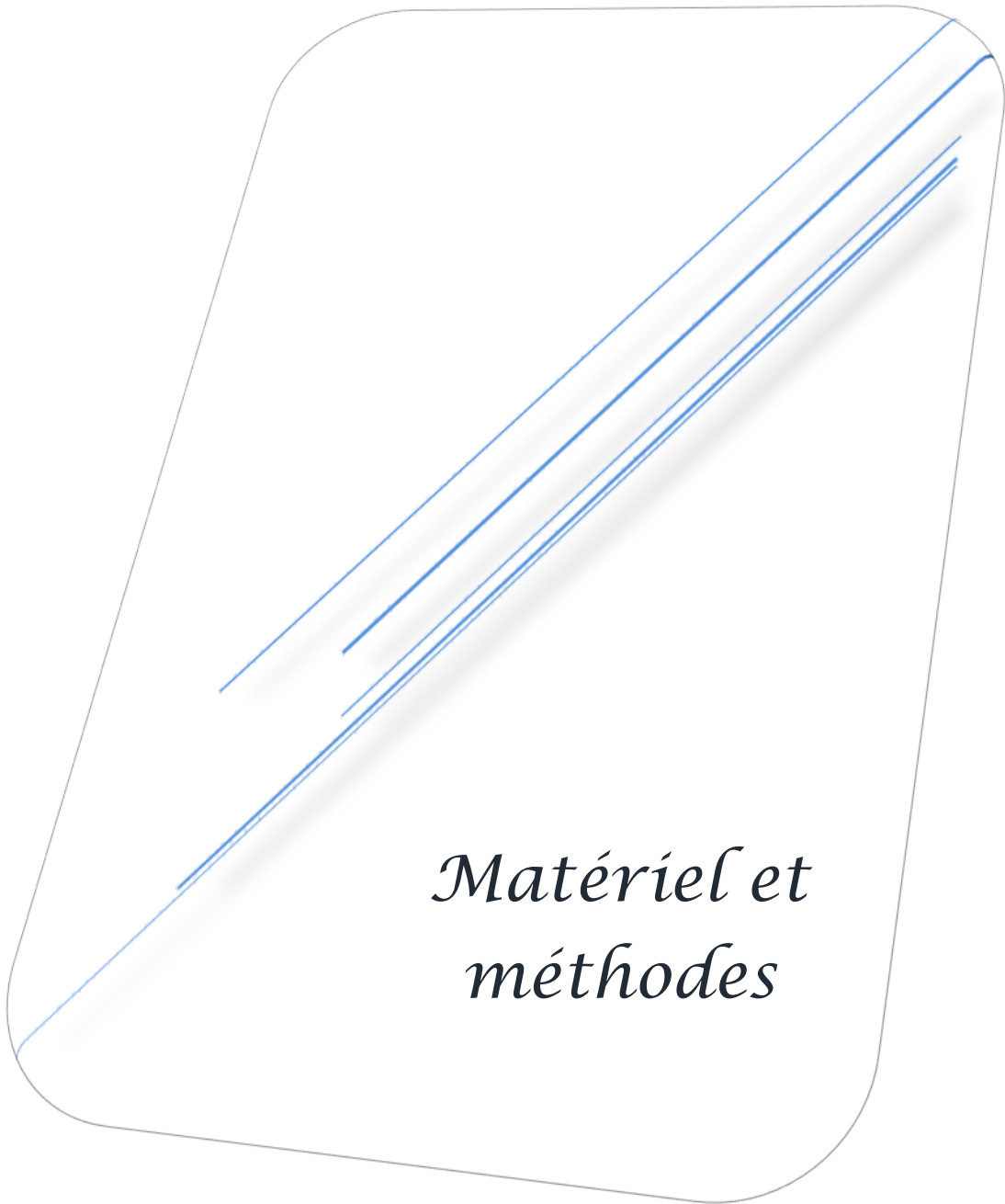
En 2003, (Rehn et al) ont traité des échantillons du pin dans une décharge à barrière diélectrique, à la pression atmosphérique sous différents mélanges de gaz . Les traitements réalisés dans des mélanges d'argon et de méthane conduisent à l'obtention d'une surface extrêmement hydrophobe, les angles de contact mesurés après traitement se situant aux alentours de  $\theta_w=104^\circ$ . Les traitements réalisés dans l'argon, l'hélium, l'azote et l'air permettent d'obtenir des surfaces plus hydrophiles.

D'autres travaux de Rehn présentent des résultats de traitement de surface obtenus sur de l'épicéa, du hêtre et du teck. Les échantillons deviennent très hydrophiles après des temps de traitement très courts (0.25s).

Les autres études concernant le traitement du bois par plasma froid ont pour objectif de rendre la surface du matériau hydrophobe grâce à la formation d'un dépôt de films polymérisés (Agnes et al.1999;Magalhães et al. 2002 ;Klarhöfer et al.2005; Wolkenhauer et al. 2008;Manolache et al.2008;Georg Avramidis et al.2009;Xu et al. 2009 ; Busnel et al.2010;Acda et al.2012;Lekobouet al. 2015).

Les recherches bibliographiques réalisées montrent qu'il existe peu d'études concernant le traitement de surface du bois par plasma et que ces traitements ont pour principal objectif de modifier l'énergie de surface du matériau afin d'optimiser l'adhésion d'un revêtement, d'une colle ou d'une finition. Aucune étude réalisée dans l'optique de conférer au bois des propriétés antifongiques n'a été trouvée.





*Matériel et  
méthodes*

---

## I. Matériel

### 1.1. Souches fongiques

Le micro-organisme utilisé tout au long de ce travail est la souche fongique *Penicillium expansum*. Il a été isolé d'un échantillon dégradé (pourri) de bois de cèdre prélevé à partir d'une vieille maison de l'ancienne médina de Fès. Cette souche peut adhérer sur la surface du bois de cèdre, d'y sécréter toute une panoplie d'enzymes (cellulase, pectinase, lignase, ... etc.) nécessaires pour dégrader les macromolécules du bois lui servant de source de carbone. (Milanesi et al.2006).

### 1.2. Substrat utilisé

Le substrat utilisé est le bois de cèdre coupé sous forme de petits morceaux dans les dimensions suivantes : Longueur : 3cm ; largeur : 1cm et épaisseur : 0,5cm. Les échantillons ainsi obtenus sont ensuite rapportés au laboratoire et frottés avec du papier abrasif de rugosité décroissante. Les mesures topographiques de la surface des échantillons sont par la suite réalisées et seuls ceux de rugosité inférieure à 1 $\mu$ m sont conservés pour la suite des manipulations. Les morceaux de bois sont ensuite lavés six fois avec de l'eau distillée, puis emballés dans du papier aluminium et autoclavés à 120°C pendant 15min. Ces échantillons ont enfin été envoyés à l'Institut des Molécules et Matériaux du Mans et seront traités en collaboration avec du Centre de Transfert de Technologie du Mans en France.

Le tableau 5 suivant regroupe l'ensemble des échantillons traités avec leurs références ainsi que la rugosité moyenne de leur surface et la nature du plasma utilisé.

**Tableau .5. : Récapitulatif des différents échantillons étudiés**

Echantillons de bois non traités /Rugosité	Échantillons traités	Référence	Rugosité ( $\mu$ m)	Plasma	Centre de traitement
	122-5	122-4	0,9	N <sub>2</sub> /Ar	Institut des Molécules et Matériaux du Mans  Centre de Transfert de Technologie du Mans en France.
122-1 (0,5 $\mu$ m)	122-6	122-5	0,9	H	
122-2 (0,7 $\mu$ m)	122-7	122-5	0,9	P	
122-3 (0,8 $\mu$ m)	123-1	122-1	0,5	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	
122-4 (0,9 $\mu$ m)	123-2	123-1	0,5	H	
	123-3	123-1	0,5	P	

	173-2 TH III	122-3	0,8	Air	
	173-3 bis TH III	122-3	0,8	Air	
	173 -4 bisTH III	122-3	0,8	N <sub>2</sub>	
	CF4		0,5	Tétrafluorure de carbone	
	CF4		0,6		
	CF4		0,7		
	CF4		0,8		
	TMS		0,5	Polymère inconnu	
	TMS		0,6		
	TMS		0,7		
	TMS		0,8		
	TMS		0,9		

## II. Méthodes

### 2.1. Adhésion microbienne sur le bois de cèdre

#### a. Préparation des suspensions fongiques

La souche fongique *Penicillium expansum* a donc été ensemencée sur la gélose à l'Extrait de Malt 2% par des stries très serrées, afin d'obtenir un tapis fongiques recouvrant toute le surface de la gélose et qui nous donnerait un maximum de spores. Les boites ensemencées sont ensuite incubées à 30°C pendant 7 à 10 jours, jusqu'à épuisement total des nutriments du milieu et formation des spores. Après ce temps d'incubation, les spores de chacune des boites ensemencées sont récoltées par raclage, avec un étaloir en verre, de la surface de cultures sporulées dans une solution de KNO<sub>3</sub> stérile à 0,1M (5,05 g dissout dans 500 ml d'Eau distillée). Les suspensions de spores récupérées séparément dans des tubes ont été concentrées par centrifugation (10000 rpm, pendant 15 min et à 4°C), et comptées avec un hématimètre de Malassez (typiquement 10<sup>7</sup> à 10<sup>8</sup> spores / ml). (El Abed et al 2010 ; Barkai et al .2014).

#### b. Test de l'adhésion

Une fois les étapes précédentes réalisées, les échantillons reçus après leurs traitements sont collés, dans des conditions stériles, au fond des boites de pétries stérilisées préalablement. La suspension de spores de *Penicillium expansum* récoltées et concentrées à 10<sup>7</sup> spores/ml, est

ensuite coulée dans les boîtes de pétri jusqu'à immersion totale des morceaux de bois. Les boîtes sont ensuite soulevées délicatement et incubée à 30°C pendant 10h.

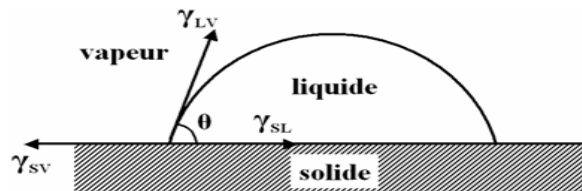
Après ce temps d'incubation, les boîtes de pétri sont retirées de l'incubateur et les morceaux de bois sont décollés les uns après les autres et rincés trois fois avec l'eau distillée stérile de façon successive en agitant prudemment les morceaux de bois pour l'élimination des spores qui n'ont pas adhéré. Les échantillons ainsi lavés sont par la suite conservés dans de nouvelles boîtes de pétri stériles. (Briandet et al.1999 ; Hamadi et al.2005 ; El Abed et al.2010 ; Barkai et al.2014)

## 2.2. Caractérisation physico chimiques des surfaces

### 2.2.1. Angle de contact

La mesure d'angle de contact rend compte de l'aptitude d'un liquide à s'étaler sur une surface par mouillabilité. La méthode consiste à mesurer l'angle de la tangente du profil d'une goutte d'un liquide déposée sur le support, avec la surface de ce support. La mesure de l'angle de contact permet d'accéder à l'énergie libre de surface. Elle permet aussi la discrimination de la nature polaire ou apolaire des interactions à l'interface liquide solide. On peut ainsi déduire le caractère hydrophile ou hydrophobe d'une surface.

Lorsqu'une goutte de liquide est déposée sur une surface solide plane, l'angle entre la tangente à la goutte au point de contact et la surface solide est appelé angle de contact  $\theta$  (Figure.3).



**Figure .3** : Technique de mesure d'angle de contact de la goutte posée (Saulou 2009)

-Si l'on utilise l'eau comme liquide de mesure d'angle de contact, on peut déduire le caractère hydrophobe (grand angle, faible énergie de surface) ou hydrophile (petit angle, grande énergie de surface) de la surface.

-Si l'on utilise d'autres liquides comme le formamide et le diiodométhane, on peut accéder à l'énergie libre de la surface, tout en discriminant les composantes polaires ou apolaires de cette

énergie en utilisant le modèle de Good Van Oss (van Oss 1988).

$$\gamma_L(\cos\theta + 1) = 2(\gamma_S^{LW}\gamma_L^{LW})^{1/2} + 2(\gamma_S^+\gamma_L^-)^{1/2} + 2(\gamma_S^-\gamma_L^+)^{1/2}$$

La composante acide-base de Lewis ( $\gamma_{AB}$ ) a été déterminée par :  $\gamma_S^{AB} = 2(\gamma_S^-\gamma_S^+)^{1/2}$

L'interaction de l'énergie libre de la surface avec l'eau ( $\Delta G_{iwi}$ ) s'écrit comme suite :

$$\Delta G_{iwi} = -2\gamma_{iw} = -2 \left[ ((\gamma_i^{LW})^{1/2} - (\gamma_w^{LW})^{1/2})^2 + 2 \left( (\gamma_i^+\gamma_i^-)^{1/2} + (\gamma_w^+\gamma_w^-)^{1/2} - (\gamma_i^+\gamma_w^-)^{1/2} - (\gamma_w^+\gamma_i^-)^{1/2} \right) \right]$$

Dont :

$\gamma_i^{LW}$  : Composantes de Lifshitz- Van der Waals de la surface ;

$\gamma_w^{LW}$  : Composantes de Lifshitz- Van der Waals de l'eau ;

$\gamma_i^+$  : Composante(s) accepteur d'électrons de la surface;

$\gamma_w^+$  : Composante(s) accepteur d'électrons de l'eau;

$\gamma_i^-$  : Composant e(s) donneur d'électrons de la surface;

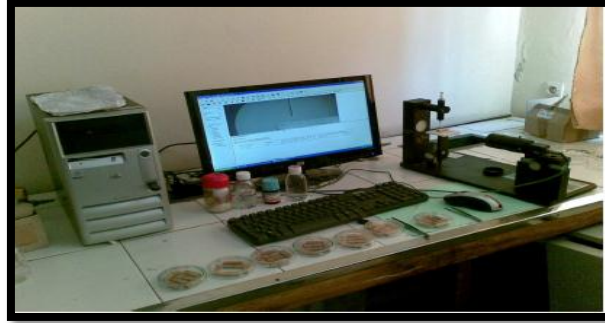
$\gamma_w^-$  : Composant e(s) donneur d'électrons de l'eau.

Les angles de contact ont été réalisés avec trois liquides purs de caractéristiques énergétiques connues (Tableau. 5) : eau distillé, diiodométhane et formamide.

**Tableau. 6. Composantes Van der waals, accepteur d'électrons et donneur d'électrons de l'énergie libre des trois liquides utilisés dans la méthode des angles de contacts**

Liquide utilisé	$\gamma^{LW}$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma^+$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma^-$ (mJ/m <sup>2</sup> )
Water H <sub>2</sub> O	21,8	25,5	25,5
Formamide (CH <sub>3</sub> NO)	39	2,3	39,6
Diiodométhane (CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub> )	50,5	0,7	0

Les caractéristiques physico-chimiques de la surface du bois sont obtenues à partir de mesures d'angles de contact à l'aide d'un goniomètre (GBX, France) (Figure.3).



***Figure. 4:*** Appareil d'angle de contact

### **2.3. Observation par microscopie Electronique à Balayage Environnemental (MEBE)**

Il existe différentes techniques de caractérisation de propriétés superficielles liées à l'adhésion microbienne ou d'autres composés avant ou après traitement des surfaces. Ils fournissent une information plus ou moins directe de l'efficacité du traitement. Parmi les techniques, on distingue entre autres les techniques microscopiques et spectroscopiques.

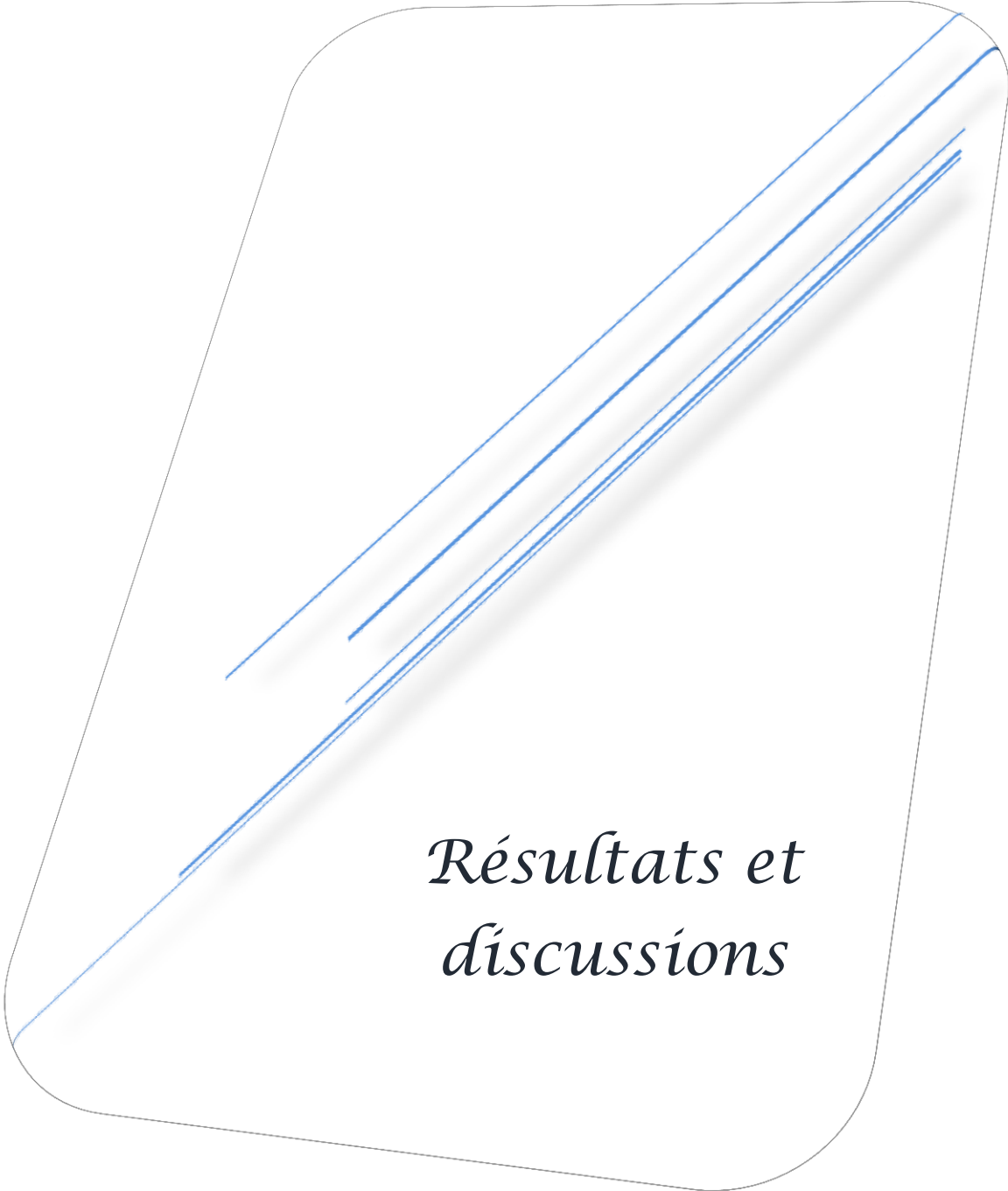
Dans notre étude nous avons utilisé, le microscope électronique à balayage (MEB) qui est une technique de microscopie basée sur le principe des interactions électrons-matière.

Le principe général consiste à envoyer un faisceau d'électrons monocinétiques qui balaye la surface de l'échantillon à analyser. En réponse, l'échantillon renvoie plusieurs rayonnements spécifiques qui permettent d'obtenir différentes informations sur l'échantillon (topographique, composition...).



***Figure.5 :*** Microscope Electronique à Balayage Environnemental (FEI, compagnie)

Ce type d'analyse a été choisi afin d'observer la surface des échantillons traités par plasma après le test d'adhésion. Les observations sont réalisées au Cité de l'Innovation



*Résultats et  
discussions*

---

# I. Caractérisations physico-chimiques de la surface du substrat : hydrophobicité et caractère donneur-accepteur d'électrons

## 1.1. Détermination de l'hydrophobicité et du caractère donneur - accepteur d'électrons du bois de cèdre

De nombreuses études ont décrit l'adhésion en termes de paramètres physico-chimique tels que l'hydrophobie et l'énergie de surface (De Meijer et al. 2000 ;Oliveira et al. 2001 ;Podgorski et al. 2002 ; El Abed et al. 2010 .2012 ; Barkai et al.2014 ). Dans ce présent travail l'objectif est d'évaluer l'effet des traitements plasma, sous différents types de gaz plasmagènes sur la physico-chimie de la surface du bois de cèdre en utilisant la méthode de l'angle de contact qui est une méthode simple et rapide y compris hydrophobicité et le caractère donneur /accepteur d'électrons. La technique d'angle de contact est la technique la plus utilisée pour la caractérisation des propriétés physico-chimiques. Elle permet également l'accès à l'énergie libre de la surface, tout en discriminant les différentes composantes de cette énergie en utilisant le modèle de Good -Van Oss (Van Oss et al.1988)

Les résultats de mesure de l'angle de contact, énergie libre d'interaction et le caractère donneur et accepteur d'électrons de la surface du bois de cèdre sont résumés dans le Tableau 7 :

**Tableau .7. : Angle de contact par rapport aux différents solvants ,énergie libre d'interaction ( $\Delta G_{iwi}$ ) ,composantes de Van der Waals ( $\gamma_{LW}$ ), composantes donneurs**

Bois non traité (Témoin)	Angles de Contact (°)			Tension de Surface: composantes et paramètres ( $mJ.m^{-2}$ )			
	$\theta_w$	$\theta_F$	$\theta_D$	$\gamma^{LW}$	$\gamma^+$	$\gamma^-$	$\Delta G_{iwi}$
	96.8±0,3	38.9±0,45	31.0±0,56	43,8±0,23	4,3±0,11	3,4±0,27	-45,83

**d'électrons ( $\gamma^+$ ) et d'accepteurs d'électrons ( $\gamma^-$ ) du bois de cèdre (n=3)**

De point de vue qualitatif et quantitatif, il semble clairement que la surface du bois présente initial



ement une surface hydrophobe, ( $\theta_w > 65^\circ$   $\Delta G_{iwi} < 0$ ).

Ces résultats corroborent avec ceux obtenus par plusieurs études en évaluant le caractère hydrophobe du même matériau, par exemple (De Meijer et al. 2000) ont trouvé une valeur d'angle de contact de l'ordre de  $69^\circ \pm 2$  lors de l'examen de la variation de la mouillabilité et l'énergie de surface sur différentes espèces du bois. (El abed et al. 2013) ont constaté également que la surface du bois présente un caractère hydrophobe quantitativement et qualitativement ( $\theta_w = 82.5^\circ \pm 3.92$ ,  $\Delta G_{iwi} < 0$ ). Ainsi (Barkai et al. 2014) ont remarqué que la surface du bois est hydrophobe qualitativement par un angle de contact avec l'eau de  $118,5^\circ$ , qui est nettement supérieur à  $65^\circ$  et quantitativement par une énergie de surface négative de  $-6,29 \text{ mJ} / \text{m}^2$ .

Pour le caractère donneur-accepteur d'électrons, le tableau 6 montre que la surface du bois étudié présente un caractère donneur-accepteur d'électrons faible ( $\gamma^+ = 4,3 \text{ mJ.m}^{-2}$ ;  $\gamma^- = 3,4 \text{ mJ.m}^{-2}$ ). Ces résultats corrélerent avec ceux trouvés par (El Abed et al. 2010) qui ont également montré que le bois de cèdre possède un caractère donneur-accepteur faible et relativement proche. Aussi (Mohammed-Ziegler et al. 2004) ont montré que la surface du bois (Aulne, Frêne, Chêne, Erable et Girofle) présentent un caractère donneur-accepteur d'électrons moins prononcé. En conclusion, le bois de cèdre étudié dans ce présent travail présente un caractère hydrophobe, un caractère donneur-accepteur électron faible.

## **1.2. Caractéristiques physico-chimiques de la surface du bois de cèdre après traitement plasma**

### **1.2.1. Détermination de l'hydrophobicité**

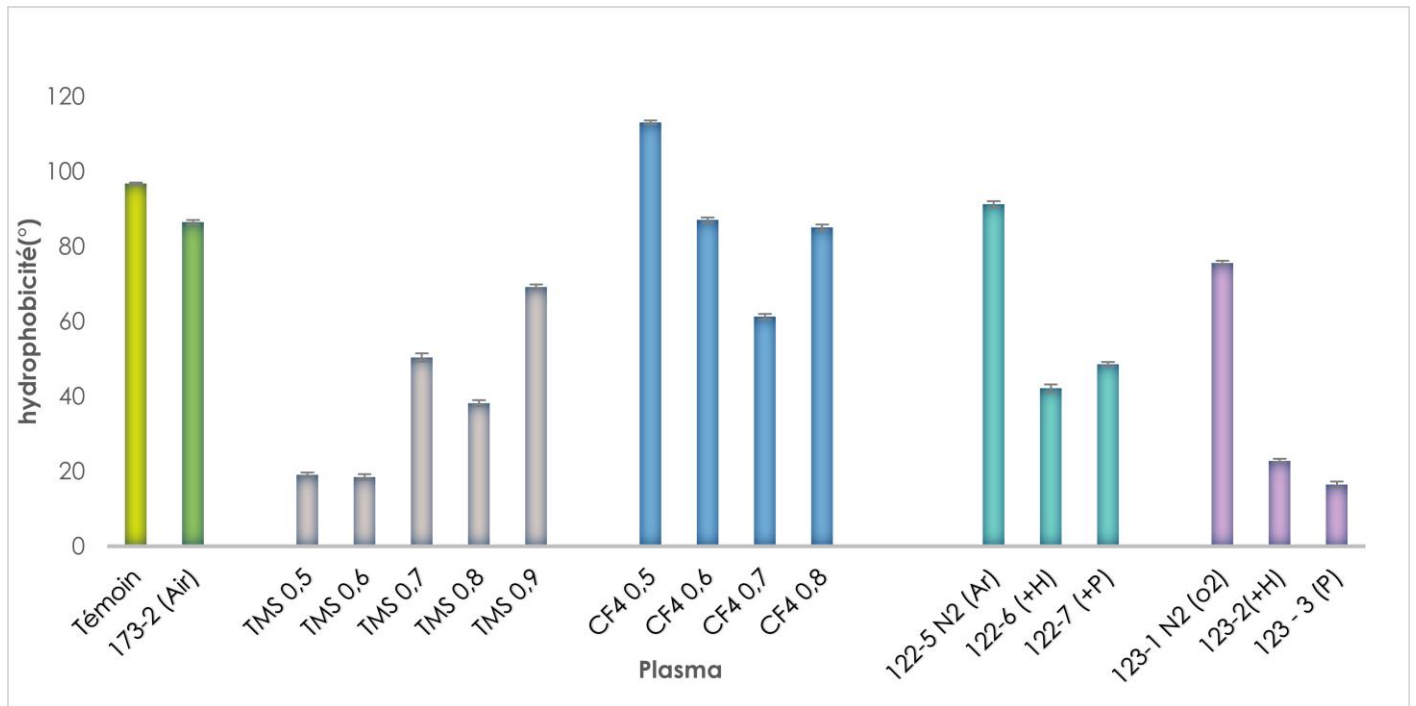
L'hydrophobicité peut être utilisée comme une méthode qualitative (angle de contact vis-à-vis de l'eau,  $\theta_w$ ) ou quantitative (Energie libre d'interaction,  $\Delta G_{iwi}$ ).

D'après (Vogler 1998), la surface est considérée hydrophobe si  $\theta_w$  est supérieur à  $65^\circ$  et hydrophile si  $\theta_w$  est inférieur à  $65^\circ$ . Basé sur l'approche de Van Oss (1988, 1995). Il est possible de déterminer le degré d'hydrophobicité d'une substance (i) vis-à-vis de l'eau (w). Il est exprimé en unité internationale ( $\text{mJ.m}^{-2}$ ). La surface est dite hydrophile quantitativement lorsque l'énergie libre d'interaction entre les deux entités de cette surface immergée dans l'eau  $\Delta G_{iwi} > 0$  et hydrophobe quantitativement lorsque  $\Delta G_{iwi} < 0$ .

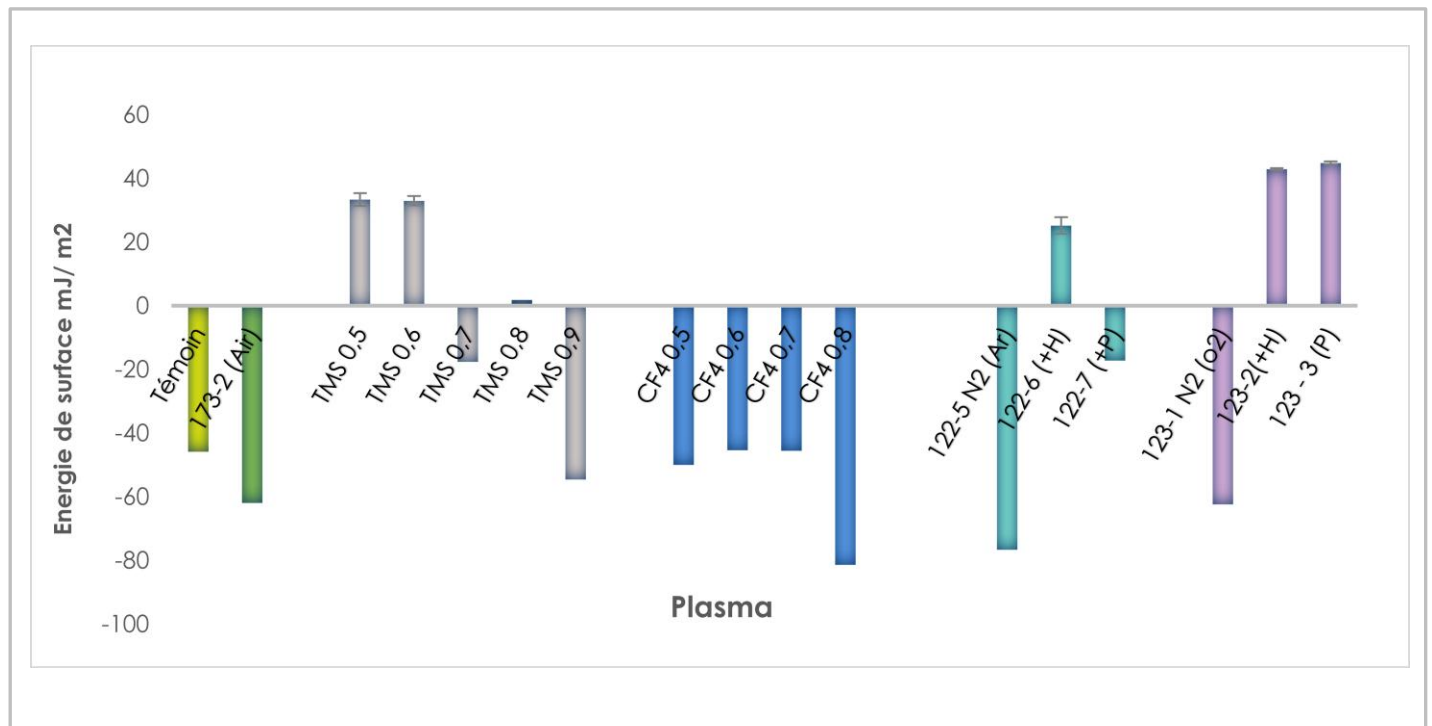
Les résultats de mesure de l'angle de contact, énergie libre d'interaction de la surface du bois de cèdre après traitement sont résumés dans le Tableau 8 :

**Tableau .8. : Angle de contact par rapport aux différents solvants, énergie libre d'interaction ( $\Delta G_{iwi}$ ), composantes de Van der Waals ( $\gamma_{LW}$ ), du bois de cèdre après traitement (n=3)**

Echantillons de bois traités par plasma	Angles de Contact (°)			$\Delta G_{iwi}$ ( mJ.m <sup>-2</sup> )
	$\theta_w$ (°)	$\theta_F$ (°)	$\theta_D$ (°)	
<b>173-2-TH III</b>	<b>86,5±0,6</b>	<b>35,0±0,71</b>	<b>35,0±0,36</b>	-61,92
<b>TMS 0.5</b>	<b>19,1±0,56</b>	<b>18,8±0,25</b>	<b>11,1±0,26</b>	33,35
<b>TMS 0.6</b>	<b>18,5±0,76</b>	<b>19,5±0,44</b>	<b>21,4±0,88</b>	32,98
<b>TMS 0.7</b>	<b>50,4±1,13</b>	<b>19,3±0,5</b>	<b>32,5±0,68</b>	-17,64
<b>TMS 0.8</b>	<b>38,2±0,79</b>	<b>19,3±1,35</b>	<b>13,0±0,36</b>	1,85
<b>TMS 0.9</b>	<b>69,2±0,67</b>	<b>19,7±1,15</b>	<b>21,9±0,85</b>	-54,58
<b>TMS-C</b>	<b>28,5±0,69</b>	<b>26,2±0,64</b>	<b>22,9±0,14</b>	25,99
<b>CF<sub>4</sub> 0,5</b>	<b>113,1±0,57</b>	<b>59,2 ±0,53</b>	<b>16,8±0,45</b>	-49,95
<b>CF<sub>4</sub> 0,6</b>	<b>87,1±0,68</b>	<b>24,6±0,55</b>	<b>35,3±0,33</b>	-45,35
<b>CF<sub>4</sub> 0,7</b>	<b>61,30±0,73</b>	<b>17,6±0,56</b>	<b>7,3±0,56</b>	-45,53
<b>CF<sub>4</sub> 0,8</b>	<b>85,1±0,80</b>	<b>37,4±0,82</b>	<b>24,1±0,40</b>	-81,36
<b>CF<sub>4</sub>-C</b>	<b>55,8±0,23</b>	<b>19,6±0,58</b>	<b>5,9±0,38</b>	-34,25
<b>122-5</b>	<b>91,3±0,80</b>	<b>40,1±0,84</b>	<b>7,2±0,77</b>	-76,62
<b>122-6</b>	<b>42,2±1,05</b>	<b>58,6±0,76</b>	<b>13,6±0,50</b>	25,18
<b>122-7</b>	<b>48,6±0,60</b>	<b>22,2±0,75</b>	<b>11,8±0,75</b>	-17,20
<b>123-1</b>	<b>75,6±0,58</b>	<b>36,4±0,72</b>	<b>26,1±1,41</b>	-62,37
<b>123-2</b>	<b>22,8±0,55</b>	<b>43,9±0,48</b>	<b>15,0±0,31</b>	42,92
<b>123-3</b>	<b>16,5±0,83</b>	<b>47,2±0,43</b>	<b>7,1±1,05</b>	44,85



**Figure .6** : Hydrophobicité qualitative du bois de cèdre en fonction du traitement plasma (n=3)



**Figure .7** : Hydrophobicité quantitative du bois de cèdre en fonction du traitement plasma (n=3)

Considérant les angles de contact de l'eau avec les différents échantillons du bois, en tant que moyen d'évaluer l'hydrophobicité (Figure 6), on constate que la surface des échantillons du bois TMS 0,5 ; TMS 0,6 ; TMS 0,8, 122-6, 123-2 et 123-3, devient hydrophile après traitement, indiqué par la chute des valeurs d'angles de contact par rapport au témoin avec une hydrophilicité bien marquée pour l'échantillon TMS 0,8. Ces résultats sont en concordance avec d'autres études (Wróbel et al. 1978 ; Asfardjani et al .1991 ;Öktem e al.2000) ;Massines et al.2001 ; Podgorski et al.2002 ;Rehn et al 2003; Vatuna et al. 2004 ; Geyteret al.2006 ; Wolkenhauer et al.2007;Karahana et al , 2008;Xu et al, 2009; Grzegorzewski.2010;Yasin et al .2012 ; Tkavc et al.2014 ;Bónová et al.2015)qui ont montré une amélioration de l'hydrophilie des différents matériaux étudiés.

Concernant, les échantillons TMS 0,7 ; TMS 0,9 ; CF4 0,5 ; CF4 0,6 ; CF4 0,7 ; CF4 0,8 ,122-5, 122-7 ,123-1 et 173-2 TH III, un caractère hydrophobe stable apparaît avec un maximum d'hydrophobicité a été enregistré pour l'échantillon CF4 0,5 révélé par une valeur de ( $\theta_w = 113,1^\circ$ ) qui est largement supérieur à  $65^\circ$  (Figure 6) et un  $\Delta G_{iwi} = -49,95$  négatif (inférieur à 0)(Figure.). Il est intéressant de souligner que lorsque la valeur de l'angle de contact est élevée (supérieure à  $100^\circ$ ), la goutte reste très stable sur la surface, elle ne s'étale pas et très peu absorbée dans le bois. Les mêmes types de résultats ont été observés dans plusieurs travaux de (Agnes et al.1999 ; Höcker et al .2002 ;Sun et al. 2004 ;Chaivan et al.2005 ;Supasai et al .2007; Leroux et al.2008).

Le plasma est un milieu gazeux riche en particules énergétiques et chimiquement actives (électrons, ions, photons, radicaux). Lorsque ces espèces interagissent avec des matériaux, elles provoquent la formation de groupements chimiques fonctionnels à la surface de ceux-ci qui dépendent de la nature de la phase gazeuse. Ceci entraîne la modification de leur énergie de surface, ce qui les confère des propriétés hydrophiles ou bien hydrophobes. De ce fait, notre étude vise à mettre en évidence l'influence des divers plasmas utilisés sur les propriétés physico-chimiques du bois de cèdre. Au total, nous avons utilisé dix-neuf échantillons du bois de cèdre. Ces différents échantillons ont été traités, sur une seule face. Les mesures de la mouillabilité ont été effectuées par la méthode de la goutte sessile. Lors de cette manipulation, nous avons pu remarquer qu'il y a une nette amélioration de l'hydrophilie après le traitement plasma pour les

échantillons, TMS 0,5 ; TMS 0,6 ; TMS 0,8 ; 122-6 ; 123-2 et 123-3. Cette amélioration peut être attribuée à l'introduction de groupements polaires de type carbonyles, carboxyles et hydroxyles à la surface. (Encinas et al. 2014; Bónová et al. 2015; Van Deynse et al. 2015). Ces résultats corroborent avec ceux obtenus par plusieurs travaux comme par exemple, (Podgorski et al. 2000; Busnel et al. 2010; Rehn et al. 2003) qui ont remarqué que la surface d'un ensemble d'échantillons du bois (Epicéa, du hêtre et du teck) devient hydrophile après un traitement plasma sous dioxygène et en décharge à barrière diélectrique. Ainsi que (Podgorski et al. 2002), ont étudié l'effet d'un traitement plasma à basse pression et en décharge couronne sur la mouillabilité du bois ayant subi préalablement un traitement thermique. Des augmentations de mouillabilité ont été obtenues après traitements par la majorité des gaz : O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar, Ar/O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>/O<sub>2</sub>. D'autres études (Wróbel et al. 1978; Öktem et al. 2000 ; Borgia et al. 2006 ; Yaman et al. 2009 ; Tkavc et al. 2014) ont montré qu'il y a une augmentation de la mouillabilité des tissus en polyester, qu'ils soient traités par plasma à pression réduite ou par plasma atmosphérique. De même (Cai et al. 2006 ; Karahan et al. 2008 ; Xu et al. 2009) ont rapporté que des traitements par plasma atmosphérique ou pression réduite de type décharge à barrière diélectrique sous différents types de gaz plasmagènes (Air, Ar, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, Air/He, O<sub>2</sub>/He,) permettent d'augmenter l'hydrophilie d'un tissu de laine ; un tissu de coton ou des tissus de viscose. Les mêmes types de résultats ont été également obtenus par (Bónová et al. 2015) qui ont étudié l'effet d'un traitement plasma à basse pression et en décharge à barrière diélectrique sur la mouillabilité de l'aluminium. Ils ont constaté que l'hydrophobicité de la surface de l'aluminium change en fonction des conditions de stockage et d'humidités. Aussi (Duske et al. 2015) ont utilisé un traitement plasma atmosphérique et en décharge à barrière diélectrique sur le titane. Ils ont remarqué une augmentation de l'hydrophilie après 60s de traitement.

En outre, pour les échantillons restants ; TMS 0,7 ; TMS 0,9 ; CF<sub>4</sub> 0,5 ; CF<sub>4</sub> 0,6 ; CF<sub>4</sub> 0,7 ; CF<sub>4</sub> 0,8 ; 122-5, 122-7, 123-1 et 173-2 TH III, nous pouvons remarquer qu'ils présentent un comportement différent de ce qui a été observé précédemment.

Ces résultats corréleront avec ceux obtenus par (Tarrade et al. 2014) qui ont remarqué une augmentation de l'angle de contact avec l'eau (157°) sur le Polyéthylène téréphtalate (PET) lors d'un traitement par plasma à pression réduite sous tétrafluorure de carbone (CF<sub>4</sub>) comme gaz plasmagène. Ils ont attribué ce caractère superhydrophobe à la création de groupements fluorés

en surface. Les mêmes types de résultats ont été obtenus par **(Poncin-Epaillard et al. 2013)** en traitant le poly (L.acide.lactique). En effet le PAL a atteint un angle de contact avec l'eau de 69°. De même **(Höcker et al.2002)** ont montré que le traitement par un plasma d'oxygène avec comme monomères de l'hexamethyldisiloxane ou de l'hexafluoréthane permet à un tissu de coton d'atteindre un angle de contact vis-à-vis de l'eau de 130°. Ainsi **(Chaivan et al.2005 ;Supasai et al.2007)** ont montré qu'un traitement par plasma à pression réduite sous hexafluoroéthane (C2F6) et l'hexafluorure de soufre (SF6) comme gaz plasmagènes permet une augmentation de l'angle de contact avec l'eau sur des tissus en coton, en laine et des sur des tissus de soie. **En 2003, (Rehn et al)** ont décrit les modifications de surface du pin dans une décharge à barrière diélectrique, à la pression atmosphérique. Les traitements réalisés dans des mélanges d'argon et de méthane conduisent à l'obtention d'une surface extrêmement hydrophobe, les angles de contact mesurés après traitement se situant aux alentours de 155°. De même **(Leroux et al. 2008)** ont traité un tissu de poly (éthylène téréphtalate) par un plasma atmosphérique de type décharges à barrière diélectrique sous air .Ils ont remarqué une augmentation de l'angle de contact avec l'eau qui est passé de 55 à 141°. En conclusion, les autres études concernant le traitement du bois par plasma froid ont pour objectif de rendre la surface du matériau hydrophobe grâce à la formation d'un dépôt de films polymérisés. **(Agnes et al. 1999 ; Magalhães et al.2002)**

### **1.2.2. Détermination du caractère donneur et accepteur d'électrons**

Les propriétés acido-basiques et donneur- accepteur d'électrons des échantillons sont obtenues à partir des mesures d'angles de contact effectuées avec de l'Eau, du Formamide et de Diiodométhane.

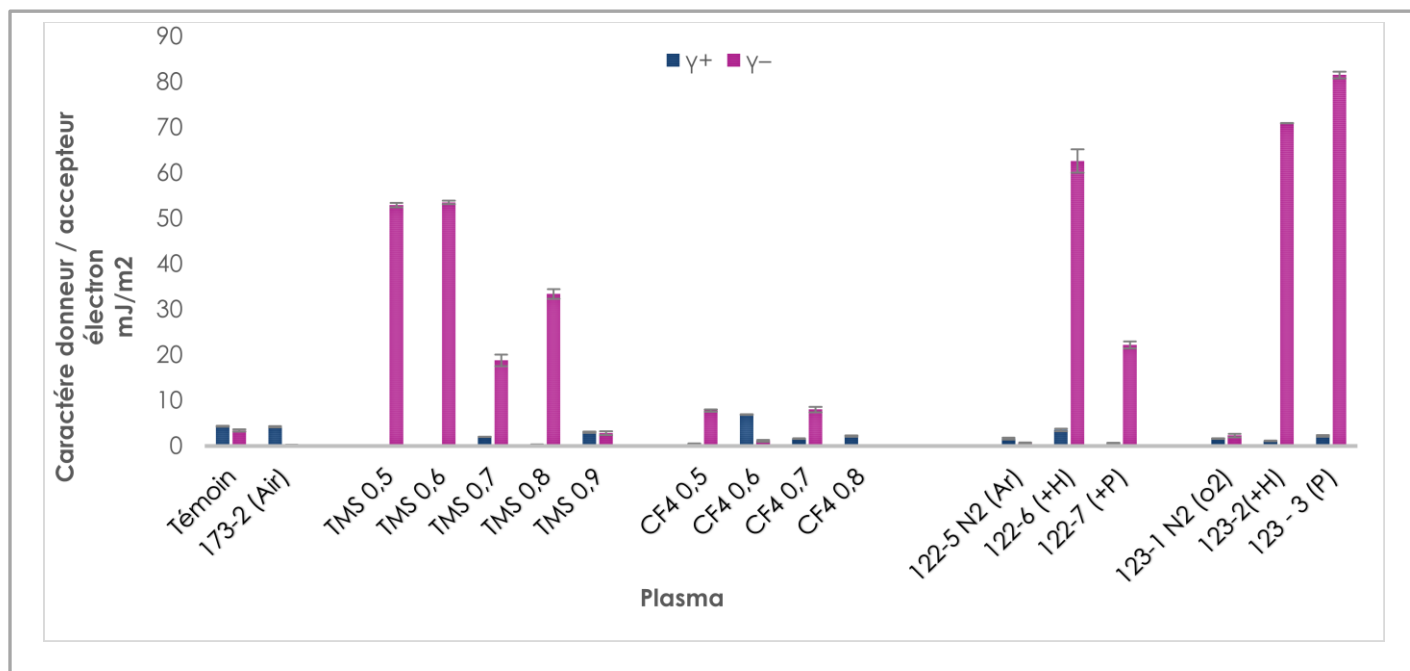
La figure7, présente les composantes donneuses d'électrons ( $\gamma^+$ ) et d'accepteurs d'électrons ( $\gamma^-$ ) des différents échantillons de bois étudiés.

Les résultats de mesure de l'angle de contact, énergie libre d'interaction de la surface du bois de cèdre après traitement sont résumés dans le Tableau 9 :

**Tableau .9. : Composantes de Van der Waals ( $\gamma^{LW}$ ), composantes donneurs ( $\gamma^-$ ) et**

Echantillons de bois traités par plasma	Tension de Surface ( $\text{mJ.m}^{-2}$ )		
	$\gamma^{LW}$	$\gamma^+$	$\gamma^-$
<b>173-2-TH III</b>	<b>42,1±0,17</b>	<b>4,2±0,15</b>	<b>0,2±0,04</b>
<b>TMS 0.5</b>	<b>49,9±0,04</b>	<b>0,0±0,00</b>	<b>52,9±0,48</b>
<b>TMS 0.6</b>	<b>47,4±0,26</b>	<b>0,1±0,02</b>	<b>53,5±0,39</b>
<b>TMS 0.7</b>	<b>43,1±0,30</b>	<b>2,0±0,06</b>	<b>18,8±1,28</b>
<b>TMS 0.8</b>	<b>49,5±0,07</b>	<b>0,3±0,05</b>	<b>33,4±1,03</b>
<b>TMS 0.9</b>	<b>47,2±0,27</b>	<b>3,0±0,13</b>	<b>2,8±0,42</b>
<b>TMS-C</b>	<b>46,9±0,04</b>	<b>0,1±0,03</b>	<b>48,0±1,17</b>
<b>CF<sub>4</sub> 0,5</b>	<b>48,7±0,11</b>	<b>0,5±0,05</b>	<b>7,8±0,24</b>
<b>CF<sub>4</sub> 0,6</b>	<b>41,9±0,14</b>	<b>6,9±0,07</b>	<b>1,1±0,20</b>
<b>CF<sub>4</sub> 0,7</b>	<b>50,4±0,07</b>	<b>1,6±0,09</b>	<b>8,0±0,59</b>
<b>CF<sub>4</sub> 0,8</b>	<b>46,5±0,14</b>	<b>2,2±0,14</b>	<b>0,0±0,00</b>
<b>CF<sub>4</sub>-C</b>	<b>50,5±0,03</b>	<b>1,0±0,05</b>	<b>13,5±0,38</b>
<b>122-5</b>	<b>50,4±0,08</b>	<b>1,6±0,22</b>	<b>0,6±0,16</b>
<b>122-6</b>	<b>49,4±0,10</b>	<b>3,5±0,29</b>	<b>62,6±2,57</b>
<b>122-7</b>	<b>49,7±0,13</b>	<b>0,6±0,07</b>	<b>22,2±0,79</b>
<b>123-1</b>	<b>45,8±0,51</b>	<b>1,6±0,09</b>	<b>2,3±0,40</b>
<b>123-2</b>	<b>49,1±0,07</b>	<b>1,1±0,07</b>	<b>70,9±0,05</b>
<b>123-3</b>	<b>50,4±0,12</b>	<b>2,2±0,16</b>	<b>81,5±0,74</b>

**d'accepteurs d'électrons ( $\gamma^+$ ) du bois de cèdre. (n=3)**



**Figure .8:** Caractère accepteur / donneur d'électrons du bois de cèdre en fonction traitement plasma (n=3)

On constate que contrairement aux échantillons 173-2TH III, TMS 0,9 et 122-5 qui présentent un caractère donneur d'électron faible à nul pour l'échantillon CF4 0,8, tous les autres échantillons ont un caractère donneur d'électron élevé ( $\gamma^-$  élevé). On note également d'après les résultats obtenus que tous les échantillons présentent un caractère accepteur d'électron faible allant vers la nullité pour l'échantillon TMS 0,5. Les valeurs du caractère accepteur d'électron varient entre 0 à  $6,9 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ . Ces résultats sont en accord en grande partie avec ceux observés dans plusieurs travaux après traitement plasma. (Gérardin et al.2007) ont démontré que le caractère donneur - accepteur d'électrons a été fortement modifié après traitement. Ils ont trouvé un caractère presque nul ( $\gamma^+ = 0,8 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$  ;  $\gamma^- = 0,7 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

Comme déjà mentionné précédemment pour l'hydrophobicité de la surface, plusieurs études sont consacrées à l'étude des éléments chimiques qui sont à l'origine du caractère donneur-accepteur. Plusieurs travaux (Felix et al .1994; Belgacem et al.1995; Biederman et al. 2001; Balazs et al.2004; Baxter et al .2005 ;Lai et al.2006; Vesel et al.2008 ; Avramidis et al.2009; Novák et al. 2015)



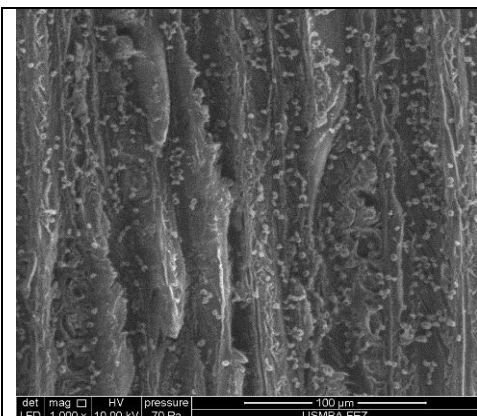
ont rapporté que la charge de la surface des différents matériaux traités par plasma peut être expliquée sur la base de la composition chimique de la surface déterminée par spectrophotométrie aux rayons X (XPS). Par exemple, (López-García et al. 2013) ont montré que des traitements par un plasma de type décharges à barrière diélectrique permettent d'augmenter l'hydrophilie d'un échantillon de polyéthylène même après un temps de traitement de l'ordre de deux minutes. De même ils ont constaté également que le caractère donneur d'électron a été fortement modifié. Les valeurs du caractère donneur d'électron varient entre 4,17 (avant traitement) à 70,1 mJ.m<sup>-2</sup>. Tandis aucun changement n'est décelable pour le caractère accepteur qui reste presque nul. Ainsi (Gérardin et al. 2007) ont constaté que le caractère donneur d'électrons a été fortement influencé. L'évolution des différentes composantes de l'énergie libre de surface peut être expliquée par des modifications chimiques qui se produisent lors du traitement. En effet, le traitement plasma se traduit par une oxydation de la surface ce qui entraîne une augmentation de la mouillabilité des substrats traités. (Zhang et al. 1998).

## **II. Adhésion expérimentale des micro-organismes au bois de cèdre: observation microscopique**

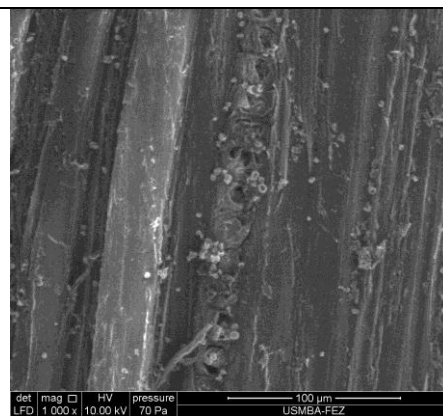
L'étude de l'hydrophobicité et de l'énergie de surface des différents échantillons de bois répond à deux objectifs : (i) évaluer l'influence des différents traitements plasma réalisés sur le caractère hydrophile-hydrophobe de la surface et (ii) relier cette chimie de surface à sa capacité ou non à inhiber l'adhésion microbienne. Le caractère hydrophile-hydrophobe des échantillons de bois a été étudié par mesure de l'angle de contact statique d'une goutte d'eau. Le bois étudié présente un caractère hydrophobe assez marqué avec un angle de contact avec l'eau d'environ  $\theta_w = 96.8^\circ$ .

Les résultats de l'adhésion des micro-organismes étudiés sur le bois obtenus p

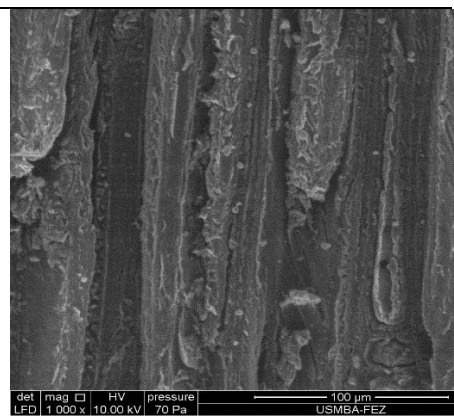
ar Microscopie Electronique à Balayage Environnemental (Figure 9 ) sont illustrés ci-dessous :



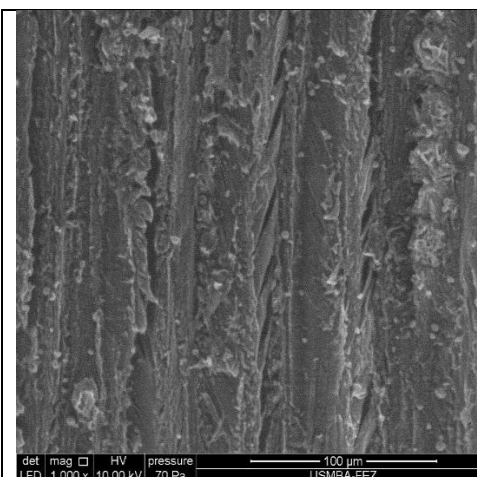
**Témoïn**



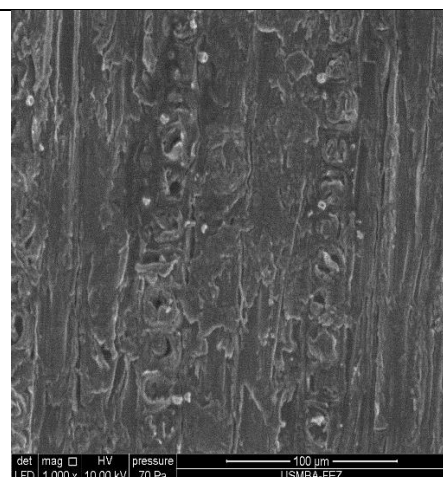
**122-1**



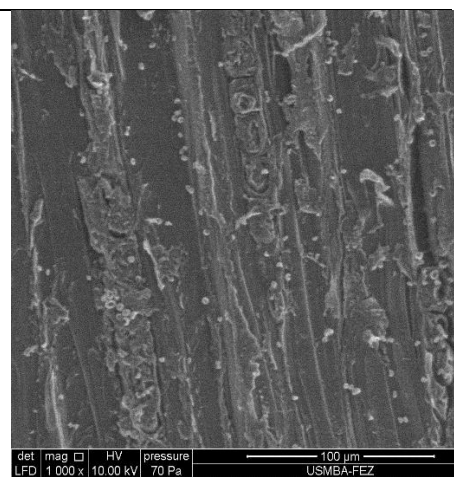
**122-5**



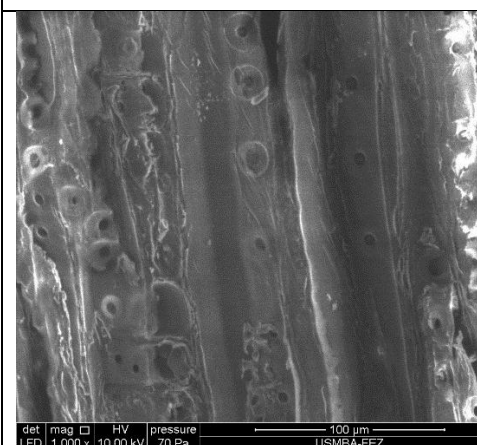
**122-6**



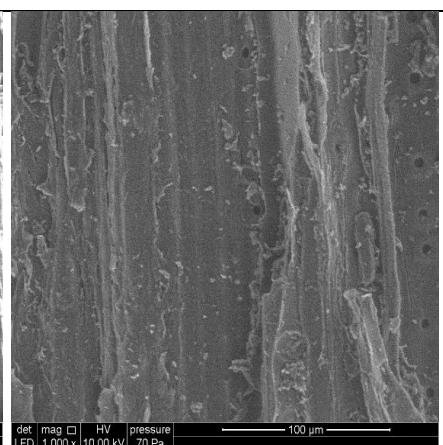
**122-7**



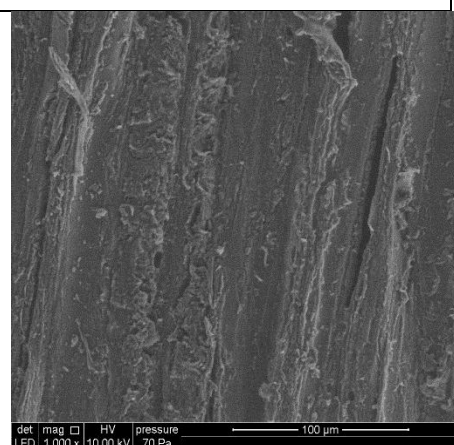
**123-3**



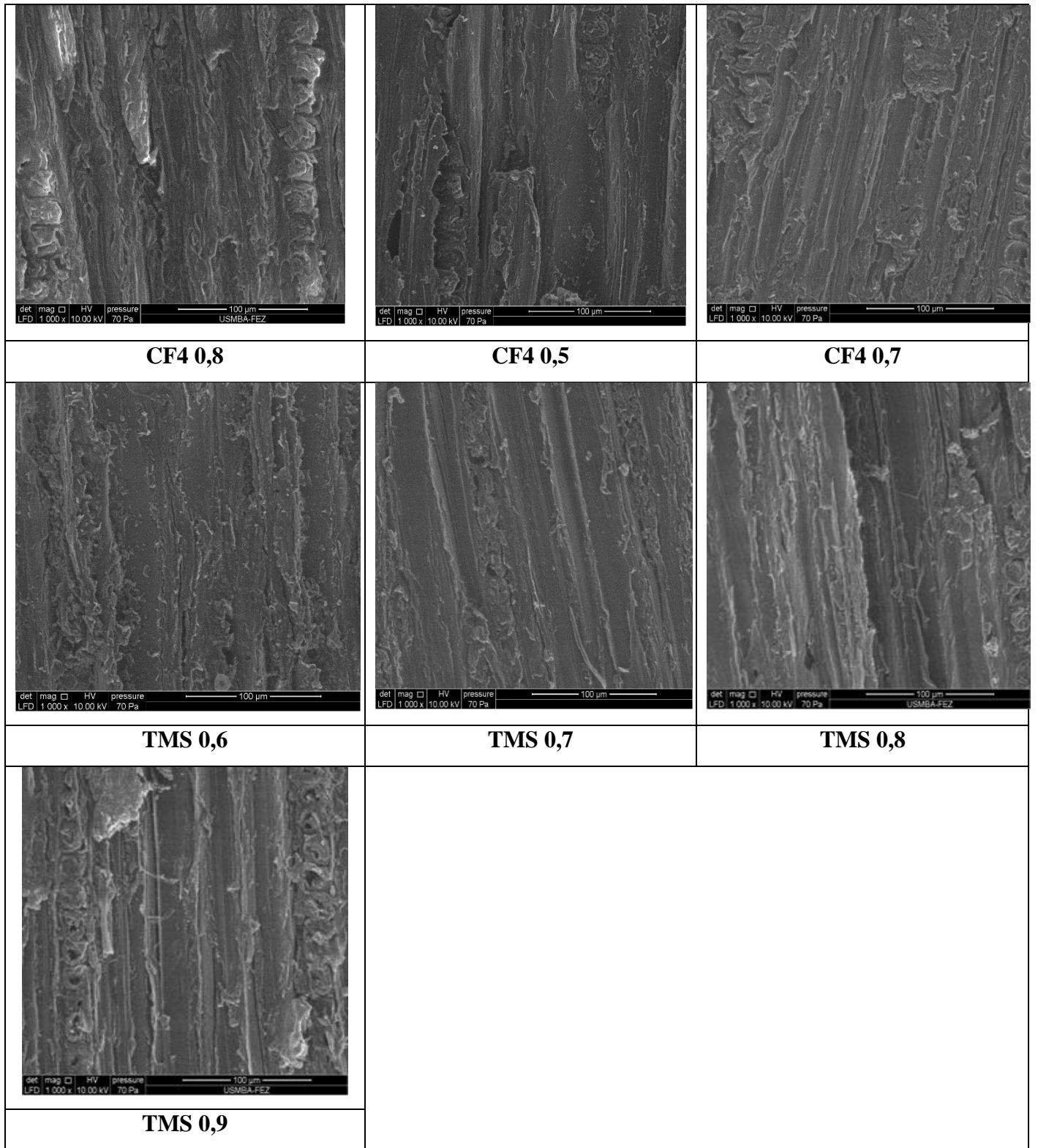
**173-4 BIS TH III**



**173-3 BIS TH III**



**CF4 0,6**



**Figure .9 :** Clichés microscopiques de l'adhésion de la souche *Penicillium expansum* à la surface du bois de cèdre (× 1000)

L'analyse des surfaces des échantillons du bois de cèdre par le MEBE montre que six échantillons (122-1,122-5,122-6,122-7,123-2 et 123-3) parmi les 16 échantillons étudiés, présentent une adhésion fongique de *Penicillium expansum*.

Nos résultats corroborent avec ceux obtenus par (Matan et al.2014) qui ont montré que l'effet combiné de l'huile de clou de girofle et un traitement plasma d'argon empêche l'adhésion et la croissance de *Penicillium sp* sur la surface de la gaine foliaire du palmier à bétel (*Areca catechu*) pendant au moins 12 semaines de stockage. De même (Suhem et al.2013) ont rapporté que le traitement plasma d'argon à 40 W pendant 20 min, des barre de céréales à base du riz brun est capable d'inhiber la croissance de *penicillium flavus* jusqu'à 20 jours dans des conditions de stockage de 25 ° C.

Quant au le comportement adhésif des champignons, d'après les clichés microscopiques obtenues (Figure 9), nous constatons également que les spores de *Penicillium expansum* restent dispersées à la surface.

L'étude des facteurs liés à l'adhésion des microorganismes aux matériaux fait l'objet d'une partie importante de la littérature dans le domaine. Il est aujourd'hui évident que de divers paramètres liés à la fois au microorganisme et à la surface solide, influencent cet attachement initial (Palmer e al. 2007 ; Pavithra et Doble.2008)

La plupart des études, réalisées, ont montré que les microorganismes adhèrent plus facilement aux matériaux hydrophobes (ex. : polyéthylène, polystyrène, Téflon, Bois), qu'aux hydrophiles (ex. : verre, métaux). (Mceldowney et Fletchert.1986 ; Donlan Costerton.2002). Dans le cas des surfaces hydrophiles des liaisons hydrogènes s'établissent entre les molécules d'eau du milieu et les groupements fonctionnels polaires du support aboutissent à la formation d'une couche d'eau organisée en réseau à la surface du support. Celle-ci provoque le phénomène de « répulsion hydrophile » avec la surface microbienne, si celle-ci est hydrophile. Au contraire dans le cas d'un support hydrophobe, les molécules d'eau restent confinées entre deux surfaces hydrophobes (support et microorganisme), leur mouvement favorise le rapprochement des surfaces, ce qui se traduit par un phénomène « d'attraction hydrophobe » (Cappella et Dietler.1999) .Donc il est chimiquement accepté que les cellules hydrophobes aient tendance à adhérer sur un substrat

hydrophobe par contre les cellules hydrophiles n'ont pas tendance à adhérer sur un substrat hydrophile.

Les travaux de (El abed soumia .2012) ont montré que la souche *Penicillium expansum* présente un caractère hydrophile ( $\theta_w > 45,3^\circ$ ,  $\Delta G_{\text{wi}} > 0$ ). Ce qui permet d'expliquer selon l'approche évoquée ci-dessus :

- La non adhérence de la souche *Penicillium expansum* sur les échantillons (TMS 0,5 ; TMS 0,6 ; TMS 0,8 ; CF4 0,5) (hydrophiles).

- La non adhérence de la même souche sur les échantillons (173 -2 TH III; TMS 0,7; TMS 0,9 ; CF4 0,5; CF4 0,6 ; CF4 0,7 ; CF4 0,8) (hydrophobes)

Ce résultat sont en accord en grande partie avec celui de (Trentin et al.2014) qui ont étudié l'impact des traitements par plasma atmosphérique sous du mélange gazeux ( $N_2 / H_2$ ) pendant 300 s à une puissance de 125 w sur une surface de polystyrène. Ils ont constaté que l'hydrophilie accrue après traitement permet une inhibition de l'adhérence des souches bactériennes (*Serratia marcescens*, *Staphylococcus aureus*, *Enterobacter cloacae*, *Staphylococcus epidermidis*) présentant également une surface hydrophile.

Cependant, les résultats concernant l'adhésion de la souche *Penicillium expansum* sur les échantillons de bois (122-6 ; 123-2 et 123-3) (hydrophiles) et (122-5 ; 122 et 123-3) (hydrophobes) ne reflètent pas cette hypothèse.

Sachant que la phase initiale de l'adhésion est dominée par les interactions de Van der Waals, la valeur négative de la composante LW indique que l'adhésion est favorable sur le bois. Les interactions acido-basiques rejoignent le processus de l'adhésion lorsque les interactions chimiques sont intervenues. La valeur positive de la composante AB implique que l'adhésion est défavorable ou faible sur le bois et vice versa.

À la lumière des résultats obtenus (tableau) (Annexe1), la composante LW est positive. De ce fait, on peut conclure que l'adhésion de la souche *Penicillium expansum* semble être dû aux interactions acide-bases entre le caractère donneur d'électron des échantillons de bois (122-6 ; 122-7 ; 123-2 et 123-3) et le caractère accepteur de *Penicillium expansum*. Alors que les

interactions de Van der waals ne sont pas impliquées dans l'adhésion des spores de *Penicillium expansum* à la surface du bois de cèdre.

Comme mentionné précédemment que les caractéristiques physico-chimiques de la surface cellulaire et du support jouent un rôle prépondérant lors de l'étape d'adhésion. Mais ça n'empêche pas qu'il y'a d'autre facteurs en relation avec les espèces réactives du plasma par exemple, (Yasin et al.2012) ont rapporté que les groupes amino créés par un traitement plasma sur l'acier inoxydable sont considérés parmi les facteurs responsables de l'activité antimicrobienne (*Enterobacter sakazakii*). Ainsi (Sakr et al. 2015) ont reporté que l'exposition des isolats de Streptomyces à des traitement plasma de type décharge à barrière diélectrique pendant 8 minutes réduit le nombre de cellules viables de manière significative. Cet effet létal peut être attribué à la production des radicaux oxygénés réactifs qui agissent vraisemblablement comme le principal facteur dans la stérilisation. Les mêmes types de résultats ont été obtenus par (Trentin et al. 2014) qui ont remarqué l'effet antibactérien des échantillons de LDPE traités a été déterminée contre le S. aureus (CCM 4516) souche bactérienne par la mesure d'un diamètre de la zone d'inhibition sur gélose une activité antiadhésive (*Klebsiella pneumoniae*, *Serratia marcescens*, *staphylococcus aureus*, *Enterobacter cloacae*) des microplaques de polystyrène traité par plasma ( $H_2/N_2$ ). Ils ont attribué cette activité à l'augmentation de groupements azotés en surface.

Finalement, certains auteurs (Yildirim et al.2005 ;Andrade et al. 2010) pour expliquer l'obtention d'une surface antiadhésive, évoquent également l'influence des différents paramètres expérimentaux du plasma tels que, la puissance, le débit et la nature de gaz, la distance entre l'échantillon et la torche du plasma et le temps d'exposition. Ainsi la littérature montre que la rugosité peut être considéré comme un facteur important qui affecte l'adhérence (Verran & Maryan, 1997 ; Radford et al.1998 ; Lamfon et al. 2003 ; Balazs et al. 2003 ; Bernardes et al.2010 ; Bazaka et al.2011 ; Popelka et al.2015). La forme et la taille des micro-organismes ont également été suggérées comme des facteurs prépondérants. (Whitehead et Verran.2009).

## Conclusion et perspectives

Dans le cadre de la lutte contre le développement des biofilms, source de graves problèmes sanitaires, industriels et économiques, notre étude s'est focalisée sur l'étape initiale du processus de formation, à savoir l'adhésion des microorganismes aux surfaces solides. Le bois de cèdre, principal matériau de construction peut être colonisé par des microorganismes responsables de son altération.

Dans ce contexte, l'objectif fondamental de ce travail de mémoire était la prévention de l'adhésion microbienne aux surfaces du bois de cèdre, par :

- La mise en place d'un traitement plasma sous différents types de gaz plasmagènes sur la surface du bois de cèdre
- l'évaluation, de l'efficacité des traitements de surface réalisés vis-à-vis de l'adhésion cellulaire de la souche fongique *Penicillium expansum*.

L'ensemble des résultats obtenus, présentés et commentés dans ce manuscrit peut être résumé suivant deux points importants :

- L'exposition du bois de cèdre à la post-décharge entraîne en surface du matériau des modifications physico-chimiques, se traduisant à l'échelle macroscopique par des variations du caractère hydrophile et hydrophobe de la surface.
- Les observations de surfaces après le test d'anti adhésion au MEBE ont montré que la plupart des échantillons montre une absence d'adhésion des spores de *Penicillium expansum*.

Pour conclure, on peut souligner ici que l'ensemble de ce travail ouvre de nombreuses portes pour l'utilisation des procédés de traitements de surface par plasma froid dans le domaine du bois. Bien que le transfert industriel ne soit pas encore totalement envisageable, nous avons montré que les traitements du bois de cèdre par plasma, à la pression atmosphérique ou à basse

pression présentait des potentialités notoires pour des applications préventives. Mais la question qui se pose, comment assurer un bon vieillissement à ces matériaux ?



## Références bibliographiques

**Abd jelim Radhia** 2011 "Modélisation de la relation entre les paramètres du procédé plasma et les caractéristiques de la qualité du matériau textile par apprentissage de données physiques". Thèse. Univ .LILLE 1

**Abdallah Marwan ; Benoliel Corinne ; Drider Djamel ; Dhulster Pascal ; Chihib Nour Eddine** 2014 "Biofilm formation and persistence on abiotic surfaces in the context of food and medical environments". *Archives of Microbiology*, 196(7), pp.453–472.

**Acda Menandro; Devera Edgar.; Cabangon Rico.; Ramos Henry** 2012"Effects of plasma modification on adhesion properties of wood". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 32, pp.70–75.

**Agnes Denes; Mandla Tshabalala ; Roger Rowell ; Ferencz Denes ; Raymond Young** 1999 "Hexamethyldisiloxane-Plasma Coating of Wood Surfaces for Creating Water Repellent Characteristics". *Holzforchung*, 53(3), pp.318–326.

**Andrade Camila; Lucia Ana ;Eduardo Carlos; Claudia Ana ; Terezinha Eunice; Cristino Nilson** 2010 "Adherence in vitro of *Candida albicans* to plasma treated acrylic resin. Effect of plasma parameters, surface roughness and salivary pellicle". *Archives of Oral Biology*, 55(10), pp.763–770.

**Anser Ali; Kim Yong Hee ; Lee Jin Young ; Lee Seunghyun ; Uhm Han Sup ; Cho Guangsup ; Park Bong Joo; Choi Eun Ha** 2014"Inactivation of *Propionibacterium acnes* and its biofilm by non-thermal plasma". *Current Applied Physics*, 14(SUPPL. 2), pp.1–7.

**Anton Popelka ; Igor Novák ; Marián Lehocký ; Ivan Chodák ; Ján Sedliačik ;Milada Gajtanska Mariana Sedliačiková ; Alenka Vesel ; Ita Junkar Angela Kleinová ; Milena Špírková ; František Bílek** 2012 "-bacterial treatment of polyethylene by cold plasma for medical purposes." *Molecules*, 17(1), pp.762–785.

**Asfardjani; Segui; Aurelle; Abidine** 1991"Effect of plasma treatments on wettability of polysulfone and polyetherimide ". *Journal of Applied Polymer Science*, 43(2), pp.271–281.

**Avramidis Georg ; Hauswal Evelyn; Lyapin Andrey ; Milit Holger ; Viöl Wolfgang ; Wolkenhauer Arndt** 2009 "Plasma treatment of wood and wood-based materials to generate hydrophilic or hydrophobic surface characteristics". *Wood Material Science and Engineering*, 4(1-2), pp.52–60.

**Baier** 1972" Organic Films on Natural Waters' Their Retrieval, Identification, and Modes of Elimination". *Journal of geophysical research*, 77(27), pp.5062–5075.

**Balazs D J ; Triandafillu ; Wood ; Chevolut ; Van Delde ; Harms ; Hollenstein ; Mathieu** 2004 "Inhibition of bacterial adhesion on PVC endotracheal tubes by RF-oxygen glow discharge, sodium hydroxide and silver nitrate treatments". *Biomaterials*, 25(11), pp.2139–2151.

**Balazs ; Triandafillu ; Chevolut ; Aronsson ; Harms ; Descouts ; Mathieu** 2003 "Surface modification of PVC endotracheal tubes by oxygen glow discharge to reduce bacterial adhesion". *Surface and Interface Analysis*, 35(3), pp.301–309.

**Barkai Hassan; El abed Soumya; Sadiki Moulay; Iraqui Houssaini Mohammeda; Ibsouda Koraichi Saadab** 2014 “A Study on the Impact of the Adhesion of *Penicillium expansum* on the Physicochemical Surface Properties of Cedar Wood”. *The Journal of Adhesion*, Mortimer House, pp. 37-41.

**Bournet SARRA** 2007 “Design et réalisation d’un réacteur plasma a pression atmosphérique pour des traitements de surfaces dans le domaine des biomatériaux. Thèse. Univ. QUÉBEC.

**Basaran; Basaran-Akgul; Oksuz** 2008 “Elimination of *Aspergillus parasiticus* from nut surface with low pressure cold plasma (LPCP) treatment”. *Food Microbiology*, 25(4), pp.626–632.

**Baxter ; Campbell ; Whittaker ; Jones ; Aitken ; Simpson ; Casey ; Bountiff ; Gibbard** 2005 “Elimination of transmissible spongiform encephalopathy infectivity and decontamination of surgical instruments by using radio-frequency gas-plasma treatment.” *Journal of General Virology*, 86(8), pp.2393–2399.

**Bazaka Kateryna; Jacob Mohan; Crawford Russell; Ivanova Elena** 2011 “Plasma-assisted surface modification of organic biopolymers to prevent bacterial attachment.” *Acta Biomaterialia*, 7(5), pp.2015–2028.

**Belgacem; Czeremuszkina; Sapiha** 1995. “Surface characterization of cellulose fibres by XPS and inverse gas chromatography.” *Cellulose*, 2(3), pp.145–157.

**Bernardes Patrícia Campos ; Andrade Nélio José ; Ferreira Sukarno Olavo ; Sá João Paulo Natalino ; Araújo Emiliane Andrade ; Delatorre Deyse Maria Zanom; Luiz Lívia Maria Pinheiro** 2010 “Assessment of hydrophobicity and roughness of stainless steel adhered by an isolate of *Bacillus cereus* from a dairy plant.” *Brazilian Journal of Microbiology*, 41(4), pp.984–992.

**Biederman Hynek ; Boyaci Ismail ; Bilkova Petra ; Slavinska Danka ; Mutlu Selma ; Zemek Josef ; Trchova Miroslava ; Klimovic Josef ; Mutlu Mehmet** 2001 “Characterization of glow-discharge-treated cellulose acetate membrane surfaces for single-layer enzyme electrode studies.” *Journal of Applied Polymer Science*, 81(6), pp.1341–1352.

**Bogaerts Annemie; Neyts Erik ; Gijbels Renaat ; Van der Mullen Joost** 2002 “Gas discharge plasmas and their applications.” *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, 57(4), pp.609–658.

**Bónová Lucia ; Zahoranová Anna; Kováčik Dušan; Zahoran Miroslav ; Mičušík Matej; Černák Mirko** 2015 “ Atmospheric pressure plasma treatment of flat aluminum surface. ” *Applied Surface Science*, 331, pp.79–86.

**Borcia; Anderson; Brown** 2006 “Surface treatment of natural and synthetic textiles using a dielectric barrier discharge.” *Surface and Coatings Technology*, 201(6), pp.3074–3081.

**Bouzidi Mohamed Chérif** 2014 “Etude d'une Décharge a Barriere Diélectrique (DBD) homogène dans l'azote a pression atmosphérique : Effet mémoire et Optimisation du transfert de Puissance”. Thèse. Univ. TOULOUSE.

**Braceras Iñigo ; Pacha-Olivenza, Miguel ; Calzado-Martín Alicia ; Multigner Marta ; Vera Carolina ; Broncano Luis Labajos ; Gallardo Moreno Amparo ; GonzálezCarrasco José Luis Vilaboa Nuria ; González Martín Luisa** 2014 “Decrease of Staphylococcal adhesion on surgical stainless steel after Si ion implantation.” *Applied Surface Science*, 310, pp.36–41.

**Branda Steven; Vik Åshild; Friedman Lisa; Kolter, Roberto** 2005 “Biofilms: The matrix revisited.” *Trends in Microbiology*, 13(1), pp.20–26.

**Brandenburg ; Ehlbeck ; Stieber ; Woedtke ; Zeymer ; Schlüter ; Weltmann** 2007 “Antimicrobial treatment of heat sensitive materials by means of atmospheric pressure Rf-driven plasma jet.” *Contributions to Plasma Physics*, 47(1-2), pp.72–79.

**Brelles-Marino; Joaquin; Bray; Abramzon** 2005 “Gas Discharge Plasma as a Novel Tool for Biofilm Destruction.” *Proceedings*, pp.69–72.

**Brelles-mariño** 2012 “Challenges in Biofilm Inactivation : The Use of Cold Plasma as a New Approach. «*Journal of Bioprocessing and Biotechniques*, 2(4), pp.2–5.

**Briandet; Meylheuc; Maher; Bellon-Fontaine** 1999 “*Listeria monocytogenes* Scott A: cell surface charge, hydrophobicity, and electron donor and acceptor characteristics under different environmental growth conditions.” *Applied and environmental microbiology*, 65(12), pp.5328–5333.

**Bussiahn ; Brandenburg ; Gerling ; Kindel ; Lange ; Lembke ; Weltmann ; Von Woedtke ; Kocher** 2010 “The hairline plasma: An intermittent negative dc-corona discharge at atmospheric pressure for plasma medical applications.” *Applied Physics Letters*, 96(14), pp.10–13.

**Cahill Orla ; Claro Tânia ; Connor Niall ; Cafolla Anthony ; Stevens Niall ; Daniels Stephen ; Humphreys Hilary** 2014 “Cold air plasma to decontaminate inanimate surfaces of the hospital environment.” *Applied and Environmental Microbiology*, 80(6), pp.2004–2010.

**Cai Zaisheng; Qiu Yiping** 2006 “The mechanism of air/oxygen/helium atmospheric plasma action on PVA.” *Journal of Applied Polymer Science*, 99(5), pp.2233–2237.

**Cao Yingguang; Yang Ping ; Lu Xinpei ; Xiong Zilan ; Ye Tao ; Xiong Qing ; Sun Ziyong** 2011 “Efficacy of Atmospheric Pressure Plasma as an Antibacterial Agent Against *Enterococcus Faecalis* in Vitro.” *Plasma Science and Technology*, 13(1), pp.93–98.

**Cappella; Dietler** 1999 “Force-distance curves by atomic force microscopy.” *Surface Science Reports*, 34(1-3), pp.1–104

**Carpentier** 1999“ Les biofilms dans l’industrie agro-alimentaire.” *Bull .Soc .Fr.Microbiol .*14,2,105-111

**Cédric Amorosi** 2012 “Polymérisation par plasma froid : un outil pour l’obtention de surfaces fonctionnalisées pour les applications de type biocapteur et pour les systèmes à libération de médicaments.” Thèse. Univ. STRASBOURG

**Chaivan; Pasaja; Boonyawa; Suanpoot; Vilaithong** 2005“Low-temperature plasma treatment for hydrophobicity improvement of silk.” *Surface and Coatings Technology*, 193(1-3 SPEC. ISS.), pp.356–360.

**Claire Prigent-Combaret, Olivier Vidal†, Corinne Dorel, and Philippe Lejeune** 1999 “Abiotic Surface Sensing and Biofilm-Dependent Regulation of Gene Expression in *Escherichia coli*.” *J. Bacteriol* , vol. 181 no. 19 5993-6002

**Compère ; Bellon-Fontaine ; Bertrand ; Costa ; Marcus ; Poleunis ; Pradier ; Rondot Walls,** 2001 “Kinetics of conditioning layer formation on stainless steel immersed in seawater.” *Biofouling*, 17(2), pp.129–145.

**Cools Leys; De Geyte; Morent** 2015 “Surface activation of polyethylene with an argon atmospheric pressure plasma jet: Influence of applied power and flow rate.” *Applied Surface Science*, 328, pp.269–278.

**Cooper; Fridman; Joshi** 2010 “Biological responses of *Bacillus stratosphericus* to Floating Electrode-Dielectric Barrier Discharge Plasma Treatment.” *Journal of Applied Microbiology*, 109(6), pp.2039–2048.

**Cooper Moogega; Fridman, Gregory ; Staack David ; Gutsol Alexander ; Vasilets Victor ; Anandan Shivanthi ; Cho Young ; Fridman Alexander ; Tsapin Alexandre** 2009 “Decontamination of surfaces from extremophile organisms using nonthermal atmospheric-pressure plasmas.” *IEEE Transactions on Plasma Science*, 37(6 PART 1), pp.866–871.

**Costerton** 1999 “Introduction to biofilm.” *International Journal of Antimicrobial Agents*, 11(3-4), pp.217–221.

**Costerton; Cheng** 1978 “How bacteria stick.” *Scientific American*, 238(1), pp.86–95.

**Costerton; Irvin** 1981 “The bacterial glycocalyx in nature disease.” *Microbiol*, pp.299–324.

**Cowle ; Babatunde ; Rauen ; Bockelmann-Evans ; Barton** 2014 “Biofilm development in water distribution and drainage systems: dynamics and implications for hydraulic efficiency.” *Environmental Technology Reviews*, 3(1), pp.31–47.

**Carvalho; Doma; Sztlyler; Beech; Cristiani** 2014 “The study of marine corrosion of copper alloys in chlorinated condenser cooling circuits: The role of microbiological components.” *Bioelectrochemistry*.97:2-6.

**Cramariuc ;Tudorache ; Popa ; Branduse ; ENisiparu ; Mitelut ; Turtoi ; Fotescu** “2008 Corona discharge in electroporation of cell membranes.” *Journal of Physics: Conference Series*, 142, p.012062.

**Daeschlein Georg ; Von Woedtke Thomas ; Kindel Eckhard ; Brandenburg Ronny ; Weltmann Klaus Dieter ; Jünger Michael** 2010 “Antibacterial activity of an atmospheric pressure plasma jet against relevant wound pathogens in vitro on a simulated wound environment.” *Plasma Processes and Polymers*, 7(3-4), pp.224–230.

**Debrabandere Delphine** 2011 “Dépôt de couches minces par plasma froid à pression atmosphérique.” Application aux dépôts de SiO<sub>x</sub> C y N z H w et de TiO<sub>x</sub>. Thèse. Univ. Bruxelles.

**De Geyter; Morent; Leys** 2006 “Surface modification of a polyester non-woven with a dielectric barrier discharge in air at medium pressure. «*Surface and Coatings Technology*, 201(6), pp.2460–2466

**De Meijer Mari; Haemers Sander; Cobben Wiro ; Militz Holger** 2000 “Surface energy determinations of wood: Comparison of methods and wood species.” *Langmuir*, 16(24), pp.9352–9359.

**Dong Shujuan** 2013 “ Effet de projection thermique de pelletes bioxygénées sur la qualité de revêtements élaborés par la projection thermique. Thèse. Univ .BELFORT MONTBELIAD .

**Donlan; Costerton** 2002 “Biofilms: Survival mechanisms of clinically relevant microorganisms.” *Clinical Microbiology Reviews*, 15(2), pp.167–193.

**Duske Kathrin ; Jablonowski Lukasz ; Koban Ina ; Matthes Rutger Holtfreter; Birte Sckell, Axel; Nebe Barbara; Woedtke Thomas Von ;Dieter Klaus; Kocher Thomas** 2015 “Biomaterials Cold atmospheric plasma in combination with mechanical treatment improves osteoblast growth on bio fi lm covered titanium discs.” *Biomaterials*, 52, pp.327–334.

**Du pont** 1997 “Understanding dental plaque; Biofilm dynamics” *J.Vet.Dent.* 14, 3, 91-93

**Ehlbeck ; Schnabel ; Polak ; Winter ; von Woedtke ; Brandenburg ; von dem Hagen, Weltmann** 2010 “ Low temperature atmospheric pressure plasma sources for microbial decontamination. ” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(1), p.013002.

**El abed Soumya; Hamadi Fatima; Latrache Hassan ;Iraqi Houssaini Mohamed ; Ibsouda Koraichi Saad** 2010 “Adhesion of *Aspergillus niger* and *Penicillium expansum* spores on Fez cedar wood substrata”. *Annals of Microbiology*, 60, pp.377–382.

**El abed Soumya; Saad Ibsouda Koraichi; Abdellah Houari; Hassan Latrache** 2013 “Experimental and theoretical investigations of the adhesion time of *Penicillium* spores to cedar wood surface”. *Materials Science and Engineering C*, 33(3), pp.1276–1281.

**El abed Soumya ; Hamadi ;Latrache ; Houari ; Koraichi** 2012 “Quantification of *Bacillus subtilis* and *Bacillus sp.* Adhesion on Fez Medina Cedar Wood.” *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(June 2013), 1506–1512.

**El abed soumya** 2012 “Approche microbiologique et physico-chimique de la biocontamination du bois de cèdre. développement de stratégies de prévention par les huiles essentielles”. Thèse. Univ. FES.

**Encinas ; Lavat-gil ; Dillingham ; Abenojar ; Martínez** 2014 “Cold plasma effect on short glass fi bre reinforced composites adhesion properties.” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 48, pp.85–91.

**Eto Hiroyuki; Ono Yoshihito; Ogino Akihisa; Nagatsu Masaaki** 2008 “Low-temperature sterilization of wrapped materials using flexible sheet-type dielectric barrier discharge.” *Applied Physics Letters*, 93(22), pp.27–30.

**Felix; Gatenholm ; Schreiber** 1994 “Plasma modification of cellulose fibers: Effects on some polymer composite properties.” *Journal of Applied Polymer Science*, 51(2), pp.285–295.

**Flemming; Meier; Schild** 2013 “Mini-review: microbial problems in paper production. ” *Biofouling*, 29(6), pp.683–96.

**Frédéric Busnel ; Vincent Blanchard ; Julien Prigent ; Luc Stafford ; Bernard Riedl ; Pierre Blanchet et Andranik Sarkissian** 2010 “Modification of Sugar Maple (*Acer saccharum*) and Black Spruce (*Picea mariana*) Wood Surfaces in a Dielectric Barrier Discharge (DBD) at Atmospheric Pressure. ” *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24(8), pp.1401–1413.

**Fridman Gregory ; Brooks Ari Balasubramanian; Manjula ; Fridman Alexander; Gutsol Alexander ; Vasilets Victor ; Ayan Halim ; Friedman Gary** 2007 “Comparison of direct and indirect effects of non-thermal atmospheric-pressure plasma on bacteria.” *Plasma Processes and Polymers*, 4(4), pp.370–375.

**Gadri Rami Ben ; Roth Reece ; Montie Thomas ; Kelly-Wintenberg Kimberly ;Tsai Peter ; Helfritch Dennis ; Feldman Paul ; Sherman Daniel; Karakaya Fuat ; Chen Zhiyu ”** 2000 “Sterilization and plasma processing of room temperature surfaces with a one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP). ” *Surface and Coatings Technology*, 131(1-3), pp.528–541.

**Gérardin Philippe ; Petrič Marko ; Petrissans Mathieu ; Lambert Jacques ; Ehrhardt Jean ; Jacques 2007** “Evolution of wood surface free energy after heat treatment.” *Polymer Degradation and Stability*, 92(4), pp.653–657.

**Gray ; Norton ; Alnouno ; Marolda ; Valvano ; Griffiths 2003** “Biological efficacy of electroless-deposited silver on plasma activated polyurethane.” *Biomaterials*, 24(16), pp.2759–2765.

**Grzegorzewski Franziska ; Rohn Sascha ; Kroh Lothar; Geyer Martin ; Schlüter Oliver 2010** “Surface morphology and chemical composition of lamb’s lettuce (*Valerianella locusta*) after exposure to a low-pressure oxygen plasma.” *Food Chemistry*, 122(4), pp.1145–1152

**Guieysse ; Norvill 2014** “Sequential chemical-biological processes for the treatment of industrial wastewaters: Review of recent progresses and critical assessment.” *J Hazard Mater* , 267:142-152.

**Guillaume Constantin 2012** “ Interfaces et durabilité d’un cœur de pile à combustible à oxyde solide fonctionnant à température intermédiaire.”Thèse .Univ . GRENOBLE.

**Hall-Stoodley; Costerton; Stoodley 2004** “Bacterial biofilms: from the natural environment to infectious diseases.” *Nature reviews. Microbiology*, 2(2), pp.95–108.

**Hamadi ; Latrache ; Mabrouki ; Elghmari ; Outzourhit ; Ellouali ; Chtaini 2005** “Effect of pH on distribution and adhesion of *Staphylococcus aureus* to glass.” *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19(1), pp.73–85.

**Herrmann; Henins; Park; Selwyn 1999** “Decontamination of chemical and biological warfare (CBW) agents using an atmospheric pressure plasma jet (APPJ)”. *PHYSICS OF PLASMAS*, 6 (5).

**Hartwig Höcker 2002** “Plasma treatment of textile fibers. «*Pure and Applied Chemistry*, 74(3), pp.423–427.

**Ikawa; Kitano; Hamaguchi 2010** “Effects of pH on bacterial inactivation in aqueous solutions due to low-temperature atmospheric pressure plasma application. «*Plasma Processes and Polymers*, 7(1), pp.33–42.

**Jaworek Anatol ; Sobczyk Arkadiusz ; Czech Tadeusz ; Krupa Andrzej 2014** “Corona discharge in electrospraying.” *Journal of Electrostatics*, 72(2), pp.166–178.

**Jeong Babayan; Park Jaeyoung ; Selwyn Gary S; Hicks Robert 1998** “The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources.” *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 26(6), pp.1685–1694.

**Kan; Chan; Yuen 1997** “Plasma Modification of Wool Fabric Effect on Fabric Properties.” *Jhkita*.

**Karahan; Ozdogan 2008** “Improvements of surface functionality of cotton fibers by atmospheric plasma treatment. «*Fibers and Polymers*, 9(1), pp.21–26.

**Kelly-Wintenberg ; Hodge Amanda ; Montie ; Deleanu Liliana ; Sherman Daniel ; Reece Roth ; Tsai Peter ; Wadsworth Larry 1999** “ Use of a one atmosphere uniform glow discharge plasma to kill a broad spectrum of microorganisms.” *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 17(4), p.1539.

**Kim Sun ; Chung ; Bae ; Leem 2009** “Bacterial inactivation using atmospheric pressure single pin electrode microplasma jet with a ground ring.” *Applied Physics Letters*, 94(14), pp.1–3.

**Klarhöfer; Frerichs; Maus-Friedrichs; Kempter; Viöl 2005** “Investigation of pure and plasma treated spruce with surface analytical techniques.” *European Conference on Wood Modification*.

**Kolter; Greenberg 2006** “Microbial sciences: the superficial life of microbes. »*Nature*, 441(7091), pp.300–302.

**Kvam Erik; Davis Brian; Mondello Frank ; Garner Allen 2012** “Nonthermal atmospheric plasma rapidly disinfects multidrug-resistant microbes by inducing cell surface damage.” *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 56(4), pp.2028–2036.

**La Barre ; Haras 2007** “Rencontres avec les bactéries marines”. *Journal de la Société de Biologie*, 201(3), pp.281–289.

**Labergue Alexandre 2005** “Etude de décharges électriques dans l’air pour le développement d’actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d’écoulements”. Thèse.Univ. Poitiers

**Lagmich Youssef 2007** “ Diagnostic et modélisation d’une décharge a barrière diélectrique pour le contrôle d’écoulement. Thèse. Univ .Toulouse III.

**Laguardia ; Vassallo ; Cappitelli ; Mesto ; Cremona ; Sorlini ; Bonizzoni 2005** “Investigation of the effects of plasma treatments on biodeteriorated ancient paper.” *Applied Surface Science*, 252(4), pp.1159–1166.

**Lai Jiangnan ; Sunderland Bob ; Xue Jianming ; Yan Sha ; Zhao Weijiang ; Folkard Melvyn ; Michael Barry ; Wang Yugang 2006** “Study on hydrophilicity of polymer surfaces improved by plasma treatment.” *Applied Surface Science*, 252(10), pp.3375–3379.

**Lai Wilson ; Lai Henry ; Kuo Spencer ; Tarasenko Olga ; Levon Kalle 2005** “ Decontamination of biological warfare agents by a microwave plasma torch.” *Physics of Plasmas*, 12(2), p.023501.

**Lamfon Hanadi; Porter Stephen; McCullough Michael; Pratten Jonathan 2003** “Formation of *Candida albicans* biofilms on non-shedding oral surfaces. »*European Journal of Oral Sciences*, 111(6), pp.465–471.

**Laroussi Mounir ; Tendero Claire ; Lu Xinpei ; Alla Sudhakar ; Hynes Wayne 2006** “Inactivation of bacteria by the plasma pencil. ”*Plasma Processes and Polymers*, 3(6-7), pp.470–473.

**Lee; Puligundla; Mok 2015** “Inactivation of foodborne pathogens on the surfaces of different packaging materials using low-pressure air plasma. *Food Control*, 51, pp.149–155. ”

**Leipold ; Kusano ; Hansen ; Jacobsen 2010**“ Decontamination of a rotating cutting tool during operation by means of atmospheric pressure plasmas.” *Food Control*, 21(8), pp.1194–1198.

**Lekobou William ; Englund Karl ; Laborie Marie-pierre ; Pedrow Patrick 2015**“ Influence of atmospheric pressure plasma treatments on the surface properties of ligno-cellulosic substrates.”*De Gruyter* (DOI: 10. 1515 /hf. 2014)

**Leroux; Campagne ; Perwuelz ; Gengembre 2008** “Fluorocarbon nano-coating of polyester fabrics by atmospheric air plasma with aerosol.” *Applied Surface Science*, 254(13), pp.3902–3908.

**Lim; Uhm; Li 2007**“Influence of oxygen in atmospheric-pressure argon plasma jet on sterilization of *Bacillus atrophaeus* spores.” *Physics of Plasmas*, 14(9).

**López-García Jorge ; Bílek František ; Lehocký Marian ; Junkar Ita ; Mozetič Miran ; Sowe Musa** 2013 “Enhanced printability of polyethylene through air plasma treatment.” *Vacuum*, 95, pp.43–49.

**Magalhães; Ferreira De Souza** 2002 “Solid softwood coated with plasma-polymer for water repellence.” *Surface and Coatings Technology*, 155(1), pp.11–15.

**Maisch** 2012 “Contact-free inactivation of *Candida albicans* biofilms by cold atmospheric air plasma.” *Applied and Environmental Microbiology*, 78(12), pp.4242–4247.

**Mandracci Pietro ; Mussano Federico ; Ceruti Paola ; Pirri Candido ; Carossa Stefan** 2015 “Reduction of bacterial adhesion on dental composite resins by silicon–oxygen thin film coatings.” *Biomedical Materials*, 10(1), p.015017.

**Manolache; Jiang; Rowell; Denes** 2008 “Hydrophobic Wood Surfaces Generated by Non-Equilibrium, Atmospheric Pressure (NEAPP) Plasma-Enhanced Coating.” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 483(1), pp.348–351.

**Marchal ; Robert ; Merbahi ; Fontagné-Faucher ; Yousfi ; Romain ; Eichwald ; Rondel ; Gabriel** 2012 “Inactivation of Gram-positive biofilms by low-temperature plasma jet at atmospheric pressure.” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45, p.345202.

**Marc** 2002. “Biofilm.” Thèse .Univ.CRETEIL.

**Nya** 2015 “Biofilms and biofouling : cost and effect on drinking water quality for human development.” *Journal of Global Biosciences*, 4(2):1571-1578.

**Massines; Gouda; Gherardi; Duran; Croquesel** 2001 “The role of dielectric barrier discharge atmosphere and physics on polypropylene surface treatment.” *Plasmas and Polymers*, 6(1-2), pp.35–49.

**Matan ; Nisoa ; Matan** 2014 “Effect of cold atmospheric plasma on antifungal activities of clove oil and eugenol against molds on areca palm (*Areca catechu*) leaf sheath.” *International Biodeterioration and Biodegradation*, 86, pp.196–201

**Matan; Nisoa; Matan** 2014 “Antibacterial activity of essential oils and their main components enhanced by atmospheric RF plasma.” *Food Control*, 39(1), pp.97–99.

**Mceldowney; Fletchert** 1986 “Variability of the Influence of Physicochemical Factors Affecting Bacterial Adhesion to Polystyrene Substrata.” *Applied and Environmental Microbiology*, pp.460–465.

**Milanesi Claudio ; Baldi Franco ; Borin Sara ; Vignani Rita ; Ciampolini Fabrizio; Faleri Claudia ; Cresti Mauro** 2006 “Biodeterioration of a fresco by biofilm forming bacteria.” *International Biodeterioration and Biodegradation*, 57(3), pp.168–173.

**Mohammed-Ziegler** 2004 “Surface free energy of natural and surface-modified tropical and European wood species.” *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(6), pp.687–713

**Morent; De Geyter; Leys; Gengembre; Payen** 2008 “Comparison between XPS- And FTIR-analysis of plasma-treated polypropylene film surfaces.” *Surface and Interface Analysis*, 40(3-4), pp.597–600.

**Morent ; De Geyte ; Leys ; Gengembre ; Payen** 2007 “Study of the ageing behaviour of polymer films treated with a dielectric barrier discharge in air, helium and argon at medium pressure.” *Surface and Coatings Technology*, 201(18), pp.7847–7854.



**Neagoe Gabriela** 2011 “Surface Treatment of Polypropylene Textile by Underwater Discharge.”Thése. Univ. MASARYK

**Novák Igor ; Popelka Anton ; Špitalský Zdeno ; Mičušík Matej ; Omastov Mária ; Valentin ; Marian ; Sedliačik Ján ; Janigov Ivica ; Kleinová Angela ; Šlouf Miroslav** 2015 “Investigation of beech wood modified by radio-frequency discharge plasma.” *Vacuum*, 119, pp.88–94.

**Oehmigen; Hähnel ; Brandenburg ; Wilke ; Weltmann ; Von Woedtketh** 2010 “The role of acidification for antimicrobial activity of atmospheric pressure plasma in liquids.” *Plasma Processes and Polymers*, 7(3-4), pp.250–257.

**Öktem; Seventekin; Ayhan; Pişkin** 2000 “Modification of polyester and polyamide fabrics by different in situ plasma polymerization methods.” *Turkish Journal of Chemistry*, 24(3), pp.275–285.

**Oliveira; Azeredo; Teixeira; Fonseca** 2001 “The role of hydrophobicity in bacterial adhesion.” *Bioline*, pp.11–22.

**Palmer; Flint; Brook** 2007 “Bacterial cell attachment, the beginning of a biofilm.” *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 34(9), pp.577–588.

**Parsek; Greenberg** 2005 “Sociomicrobiology: The connections between quorum sensing and biofilms.” *Trends in Microbiology*, 13(1), pp.27–33.

**Pasmore; Costerton** 2003 “Biofilms, bacterial signaling, and their ties to marine biology.” *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 30(7), pp.407–413.

**Pavithra; Doble** 2008 “Biofilm formation, bacterial adhesion and host response on polymeric implants-- issues and prevention.” *Biomedical materials (Bristol, England)*, 3(3), p.034003.

**Podgorski Laurence; Chevet Bruno; Onic Ludivine; Merlin André** 2000 “Modification of wood wettability by plasma and corona treatments.” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(2), pp.103–111.

**Podgorski; Boust; Schambourg; Maguin; Chevet** 2002 “Surface modification of wood by plasma polymerisation.” *Pigment & Resin Technology*, 31(1), pp.33–40.

**Polini; Sorrentino** 2003 “Improving the wettability of 2024 aluminium alloy by means of cold plasma treatment.” *Applied Surface Science*, 214(1-4), pp.232–242.

**Poncin-Epaillard; Shavdina; Debarnot** 2013 “Elaboration and surface modification of structured poly (l-lactic acid) thin film on various substrates.” *Materials Science and Engineering C*, 33(5), pp.2526–2533.

**Popelka ; Novák ; Lehock ; Bílek3 ; Kleinová ; Mozeti ; pírková ; Chodák** 2015 “Antibacterial treatment of LDPE with halogen derivatives via cold plasma.” *Express Polymer Letters*, 9(5), pp.402–411.

**Radford; Sweet; Challacombe; Walter** 1998 “Adherence of *Candida albicans* to denture-base materials with different surface finishes.” *Journal of dentistry*, 26(7), pp.577–583.

**Rehn** 2003 “Mechanical properties of TiNyTiB2 multilayers deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition.” *Surface and Coatings Technology*, 174 -175, pp.720–724.

**Rehn; Viöl** 2003 “Dielectric barrier discharge treatments at atmospheric pressure for wood surface modification.” *Holz als Roh - und Werkstoff*, 61(2), pp.145–150.

**Römling; Kjelleberg; Normark; Nyman; Uhlin; Åkerlund 2014**” Microbial biofilm formation: A need to act. “*Journal of Internal Medicine*, 276(2), pp.98–110.

**Rosmaninho Roxane ; Santos Olga ; Nylander Tommy ; Paulsson Marie ; Beuf Morgane ; Benezech Thierry ; Yiantsios Stergios ; Andritsos Nikolaos ; Karabelas Anastasios ; Rizzo Gerhard ; Müller Steinhagen Hans 2007** “Modified stainless steel surfaces targeted to reduce fouling - Evaluation of fouling by milk components.”*Journal of Food Engineering*, 80(4), pp.1176–1187

**Sabharwal Harmohinder; Denes Ferencz. Nielsen Lynette. ; Young Raymond 1993** “Free-radical formation in jute from argon plasma treatment.”*Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41(11), pp.2202–2207.

**Sakr Akmal ; El-Shaer Mohamed Ghaly Mohamed ; Abdel-Haliem Mahmoud 2015** “Efficacy of dielectric barrier discharge (DBD) plasma in decontaminating Streptomyces colonizing specific Coptic icons. “*Journal of Cultural Heritage*.

**Santos Olga ; Nylander Tommy ; Rosmaninho Roxane ; Rizzo Gerhard ; Yiantsios Stergios ; Andritsos Nikolaos ; Karabelas Anastasios ; Müller-Steinhagen Hans ; Melo Luis ; Boulangé-Petermann Laurence ; Gabet Christelle ; Braem Alan ; Trägårdh Christian ; Paulsson Marie 2004** “Modified stainless steel surfaces targeted to reduce fouling - Surface characterization. ”*Journal of Food Engineering*, 64(1), pp.63–79.

**Sato; Doi; Urayama; Nakatani; Miyahara 2007**”Inactivation of *Escherichia Coli* by a Coaxial Microwave Plasma Flow. “*IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(5), pp.1159–1163.

**Saulou Claire 2009** ”Evaluation des propriétés anti-adhésives et biocides de films nanocomposites avec inclusions d’argent, déposés sur acier inoxydable par procédé plasma. Evaluation. ”Thèse. Univ. TOULOUSE.

**Schwabedissen ; Łaciński ; Chen ; Engemann 2007** “PlasmaLabel - A new method to disinfect goods inside a closed package using dielectric barrier discharges.”*Contributions to Plasma Physics*, 47(7), 551–558.

**Selcuk ; Oksuz ; Basaran 2008** “ Decontamination of grains and legumes infected with *Aspergillus* spp. and *Penicillium* spp. by cold plasma treatment. ”*Bioresource Technology*, 99(11), 5104–5109.

**Serres 2010** “Réalisation et caractérisation de revêtements épais éco-respectueux réalisés par voie sèche destinés à remplacer des dépôts électrolytiques. ”Thèse .Univ .STRASBOUR

**Shaw ; Monis ; Fabris ; Ho ; Braun ; Drikas ; Cooper 2014** “ Assessing the impact of water treatment on bacterial biofilms in drinking water distribution systems using high-throughput DNA sequencing.”*Chemosphere*, 117C, 185–192.

**Shin ; Bang ; Kim ; Han ; Hong ; Uhm ; Kim 2007** “Modification of metal surfaces by microwave plasma at atmospheric pressure.” *Surface and Coatings Technology*, 201(9-11 SPEC. ISS.), 4939–4942.

**Shin ; Sobsey 2003** “Reduction of Norwalk virus, poliovirus 1, and bacteriophage MS2 by ozone disinfection of water. ”*Applied and Environmental Microbiology*, 69(7), 3975–3978.

**Shin ;Son ;Yoo ; Hudson ; McCord ; Matthews ;Whang 2006** “Functional finishing of nonwoven fabrics. I. Accessibility of surface modified PET spunbond by atmospheric pressure He/O<sub>2</sub> plasma treatment.” *Journal of Applied Polymer Science*, 100(6), 4306–4310.

**Sladek ; Stoffels 2005** “By the Plasma Needle.” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(11), 1716–1721.

**Suhem ; Matan ; Nisoa, Matan 2013** “Inhibition of *Aspergillus flavus* on agar media and brown rice cereal bars using cold atmospheric plasma treatment.” *International Journal of Food Microbiology*, 161(2), 107–111.

**Sun ; Stylios 2004** “Effect of Low Temperature Plasma Treatment on the Scouring and Dyeing of Natural Fabrics.” *Textile Research Journal*, 74(9), 751–756.

**Supasai ; Hodak ; Paosawatyanong 2007** “Effect of SF<sub>6</sub> plasma treatment on hydrophobicity improvement of fabrics.” *Jurnal Fizik Malay Sia*, 28(1), 2–7.

**Taniguchi ;Van Landschoot ; Schoonman 2003** “Fabrication of La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>Co<sub>1-y</sub>FeyO<sub>3</sub> thin films by electrostatic spray deposition.” *Solid State Ionics*, 156(1-2), 1–13.

**Tarrade ; Darmanin ; Taffin De Givenchy ; Guittard ; Debarnot ; Poncin-Epaillard 2014** “Texturation and superhydrophobicity of polyethylene terephthalate thanks to plasma technology.” *Applied Surface Science*, 292, 782–789.

**Taylor ;Denes ;Hua ; Barrios ; Young Evans 2015** “Influence of RF-Cold Plasma Treatment on the Surface Properties of Paper. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 37-41.

**Tendero 2005** “Torche plasma micro-onde à la pression atmosphérique : application au traitement de surfaces métalliques”.Thèse . Univ . LIMOGES

**Tendero ;Tixier ;Tristant ;Desmaison ; Leprince 2006** “Atmospheric pressure plasmas: A review.” *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, 61(1), 2–30.

**Tendero ; Tixier ; Tristant ; Desmaison ; Leprince 2006** Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, 61(1), 2–30.

**Thomas ; Trintchina ; Forero ; Vogel ; Sokurenko 2002** Bacterial adhesion to target cells enhanced by shear force. *Cell*, 109(7), 913–23.

**Tkavc ; Petrinič ; Luxbacher ; Vesel ; Ristić ; Zemljič 2014** Influence of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> plasma treatment on the deposition of chitosan onto polyethylene terephthalate (PET) surfaces. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 48, 168–176.

**Tlili 2010** “Caractérisation de films durs multicouches élaboré par pulvérisation magnétron. Influence des conditions d’élaboration sur leurs propreté.” Thèse . Univ .TUNIS

**Tolker-Nielsen ; Molin 2000** “Spatial Organization of Microbial Biofilm Communities.” *Microb Ecol*, 40(2), 75–84.

**Tremblay ; Hathroubi ; Jacques 2014**“ Biofilms Bacteria Antibiotico\_Resistentes, 110–116.”

**Trentin ; Bonatto ; Zimmer ; Ribeiro ; Antunes ; Barth ; Macedo 2014** “N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> plasma surface modifications of polystyrene inhibit the adhesion of multidrug resistant bacteria. ”*Surface and Coatings Technology*, 245, 84–91.

**Van Deynse ; Cools ; Leys ; De Geyter ; Morent 2015** “Surface activation of polyethylene with an argon atmospheric pressure plasma jet: Influence of applied power and flow rate. ”*Applied Surface Science*, 328, 269–278.

**Van Oss; Giese 1995**“The hydrophobicity and hydrophobicity of clay minerals.” *Clays and Clay Minerals*, 43(4), pp.474–477.

**Van Oss 1988**“Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems.” *Chemical Reviews*, 88(6), pp.927–941

**Vandecasteele Nicolas 2008**“ Etude du rôle des espèces constitutives d'un plasma pour la fonctionnalisation de surfaces polymériques.” Thèse . Univ . BRUXELLES.

**Vassal ; Favennec ; Ballet ; Brasseur 1998** “Hydrogen peroxide gas plasma sterilization is effective against *Cryptosporidium parvum* oocysts. ”*American Journal of Infection Control*, 26(2), 136–138.

**Vatuna 2004**” PES fabric plasma modification.“ *Journal of Physics*, 54, 475–482.

**Venezia ; Orrico ; Houston ; Yin ; Naumova 2008** “Lethal activity of nonthermal plasma sterilization against microorganisms. ”*Infection Control and Hospital Epidemiology: The Official Journal of the Society of Hospital Epidemiologists of America*, 29(5), 430–436.

**Verran ; Maryan 1997** “Retention of *Candida albicans* on acrylic resin and silicone of different surface topography.” *Journal of Prosthetic Dentistry*, 77(5), 535–539.

**Vesel ; Junkar ; Cvelbar ; Kovac ; Mozetic 2008** “Surface modification of polyester by oxygen- And nitrogen-plasma treatment. ”*Surface and Interface Analysis*, 40(11), 1444–1453.

**Wang ; Ben ; Li ; Xu ; Yuan 2014**“ Bonding Performance of Wood Treatment by Oxygen and Nitrogen Cold Plasma. ”*Applied Mechanics and Materials*, 633-634, 583–588.

**Weltmann ; Brandenburg ; von Woedtke ; Ehlbeck ; Foest ; Stieber ; Kindel 2008** “Antimicrobial treatment of heat sensitive products by miniaturized atmospheric pressure plasma jets (APPJs). ”*Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(19), 194008.

**Weng ; Wu ; Liao ; Kao ; Chao ; Chang ; Hsu 2009** “Inactivation of bacteria by a mixed argon and oxygen micro-plasma as a function of exposure time. ”*International Journal of Radiation Biology*, 85(4), 362–368.

**Vogler Erwin 1998** “ Structure and reactivity of water dans biomateriel surface.”*Journal advances in colloid and interface science* .69-117.

**Whitehead ; Verran** 2009 “The effect of surface topography on the retention of microorganisms.253–259.” *Food and Bioproducts Processing* , 84 (C4) : 253-259.

**Will ; Mitterdorfer ; Kleinlogel ; Perednis ; Gauckler** 2000 “Defense Technical Information Center Compilation Part Notice solid fabrication of thin electrolytes for second-generation solid oxide fuel cells.” *Solid State Ionics*, 131, 79–96.

**Wilson ; Williams ; Pond** 2001 “Plasma modification of PTFE surfaces - Part I: Surfaces immediately following plasma treatment.” *Surface and Interface Analysis*, 31(5), 385–396.

**Wolkenhauer ; Avramidis ; Cai ; Militz ; Viöl** 2007 Investigation of wood and timber surface modification by dielectric barrier discharge at atmospheric pressure. ” *Plasma Processes and Polymers*, 4(SUPPL.1), 470–474.

**Wolkenhauer ; Avramidis ; Hauswald ; Militz ; Viöl** 2008“ Plasma Treatment of Wood–Plastic Composites to Enhance Their Adhesion Properties.” *Journal of Adhesion Science and Technology*, 22(16), 2025–2037.

**Wróbel ; Kryszewski ; Rakowski ; Okoniewski ; Kubacki** 1978 “Effect of plasma treatment on surface structure and properties of polyester fabric.” *Polymer*, 19(8), 908–912.

**Xu ; Guo ; Zhou ; Lv** 2009 Effects of expandable graphite and modified ammonium polyphosphate on the flame-retardant and mechanical properties of wood flour-polypropylene composites. *Polymers and Polymer Composites*, 21(7), 449–456.

**Yaman ; Özdoğan ; Kocum ; Ayhan ; Öktem ; Seventekin** 2009 “Improvement surface properties of polypropylene and polyester fabrics by glow discharge plasma system under atmospheric condition.” *Tekstil ve Konfeksiyon*, 19(1), 45–51.

**Yasin, ; Ba ; Güleç ; Mutlu** 2012 “ Modification of Food-Contacting Surfaces by Plasma Polymerization Technique : Reducing the Biofouling of Microorganisms on Stainless Steel Surface. ”166–175.

**Yildirim ; Hasanreisoglu ; Hasirci ; Sultan** 2005 “Adherence of Candida albicam to glow-discharge modified acrylic denture base polymers. *Journal of Oral Rehabilitation*. ” 32(7), 518–525.

**Yong Hae ; Kim ;Park ; Alahakoon ; Kim ; Choe** 2015 “Evaluation of pathogen inactivation on sliced cheese induced by encapsulated atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma.” *Food Microbiology*, 46, 46–50.

**Zhang ; Sun ; Wadsworth** 1998 “Mechanism of corona treatment on polyolefin films. ” *Polymer Engineering & Science*.” 38(6), 965–970.

**Zimmermann ; Dumler ; Shimiz ; Morfill ; Wolf ; Boxhammer ; Anton** 2011 “Effects of cold atmospheric plasmas on adenoviruses in solution. ” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(50), 505201.

## Annexes

### Annexe 1 :

**Tableau.10.** : Composition du milieu de culture utilisé (Extrait de Malt)

Constituant	Quantité
Extrait de Malte	30g/l
Agar	15-20g/l

### Annexe 2 :

**Tableau .11.** : Composition de la solution de KNO<sub>3</sub> 0,1 M (0,5 L)

Constituant	Quantité
KNO <sub>3</sub> (poudre)	5,055 g
Eau distillé stérile	500mL



## Résumé

Ce travail a consisté à étudier les potentialités d'un traitement par plasma froid pour des applications antifongiques préventives du bois de cèdre. Les traitements sont réalisés sous différents types de gaz plasmagènes.

Dans la première partie de ce manuscrit, la méthode de la goutte posée a permis de mettre en évidence les modifications physico chimiques engendrées par le traitement plasma sur la surface du bois de cèdre, en se basant sur leur comportement vis-à-vis de l'eau distillée. L'évolution des différentes composantes de la tension de surface peut être expliquée par des modifications chimiques produites lors du traitement par plasma. L'étude s'est ensuite focalisée sur l'évaluation de l'effet des traitements réalisés sur l'adhésion des microorganismes à la surface du bois de cèdre. Pour ce test, les échantillons ont été soumis à l'adhésion des spores de la souche fongique *Penicillium expansum* isolée à partir du bois de cèdre dégradé. Le traitement de la surface du bois a mis en évidence une efficacité antiadhésive pour la majorité des échantillons étudiés. En outre les autres présentent qui reste une adhésion faible.

**Mots-clés** : Plasma froid, Bois de cèdre, Champignons, Angle de contact, MEBE.