

THESE DE DOCTORAT

Présentée à

**L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
LILLE**

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LILLE 1

Discipline: Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images

Par

Radhia ABD JELIL

**Modélisation de la relation entre les paramètres
du procédé plasma et les caractéristiques de la
qualité du matériau textile par apprentissage de
données physiques**

Le 28 Avril 2010, devant la commission d'examen

M Marc RENNER	Professeur et directeur de l'INSA de Strasbourg	Président du jury
M José RAGOT	Professeur, INPL, Lorraine	Rapporteur
Mme Faten FAYALA	Maître assistante HDR, ENIM, Monastir	Rapporteur
M Nicolas BOSCHER	Chercheur, CRP Gabriel Lippmann, Luxembourg	Examineur
Mme Anne PERWUELZ	Professeur, ENSAIT, Roubaix	Examineur
M Xianyi ZENG	Professeur, ENSAIT, Roubaix	Directeur de thèse
M Ludovic KOEHL	Maître de conférences, HDR, ENSAIT, Roubaix	Co-directeur de thèse

A mes parents et à mes frères et sœurs

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été réalisé à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT) dirigée par le Professeur Xavier FLAMBARD, au sein du Laboratoire Génie et Matériaux TEXTiles (GEMTEX) dirigé successivement par les Professeurs Eric DEVAUX et Vladan KONCAR. Je leur exprime ma très vive gratitude pour m'avoir accueilli dans leur établissement.

Je tiens à remercier Monsieur Marc RENNIR, Professeur et Directeur de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je remercie également Monsieur José RAGOT, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), et Madame Faten FAYALA, Maître assistante HDR à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (ENIM)- Tunisie, pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse en acceptant d'être rapporteurs.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Nicolas BOSCHER, Chercheur au Centre de Recherche Gabriel Lippmann- Luxembourg, pour avoir accepté d'être examinateur et pour l'honneur qu'il m'a fait de participer au jury.

Je remercie vivement Monsieur Xianyi ZENG, Professeur des universités à l'ENSAIT, pour avoir dirigé cette thèse. Je le remercie également pour ses conseils avisés, ses multiples encouragements, sa bonne humeur et pour le temps qu'il a su m'accorder.

Mes profonds remerciements vont également à Monsieur Ludovic KOEHL, Maître de Conférences à l'ENSAIT et Co-directeur de thèse, pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail. Ses conseils ont été très enrichissants et je le remercie pour sa disponibilité et son écoute.

J'adresse des remerciements particuliers à Madame Anne PERWUELZ, Professeur des universités à l'ENSAIT, pour son aide précieuse dans le domaine du plasma et sa contribution à l'avancement de ce travail. Je le remercie également pour sa disponibilité, sa gentillesse, ses nombreuses discussions scientifiques, ses explications toujours limpides, son suivi de l'évolution de travail et pour le grand intérêt qu'elle y a porté. Qu'elle trouve ici l'expression de ma plus sincère gratitude.

Je remercie vivement le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de la Tunisie, pour avoir supporté financièrement cette thèse.

Je voudrais également remercier toute l'équipe de doctorants du laboratoire GEMTEX ainsi que l'équipe d'enseignants chercheurs et le personnel de l'ENSAIT pour leur accueil, leur bonne humeur et leur contribution au bon déroulement de mon travail de recherche. Je remercie tout particulièrement Monsieur Christian CATEL pour son aide concernant le procédé de traitement par plasma et Monsieur François DASSONVILLE pour sa contribution au niveau du profilomètre optique.

Enfin, un grand merci à mes parents, famille et amis pour m'avoir supportée et encouragée tout au long de cette thèse.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LE TRAITEMENT DES MATERIAUX TEXTILES PAR PLASMA.....	7
1.1 Généralités sur les Plasmas.....	8
1.1.1 Définitions.....	8
1.1.2 Grandeurs caractéristiques	9
1.1.2.1 Libre parcours moyen.....	9
1.1.2.2 Température électronique.....	9
1.1.2.3 Densité des espèces et taux d'ionisation	9
1.1.2.4 Longueur de Debye	10
1.1.3 Classification.....	10
1.1.3.1 Les plasmas chauds	10
1.1.3.2 Les plasmas thermiques	10
1.1.3.3 Les plasmas non-thermiques ou plasmas froids	11
1.1.4 Phénomènes de collision	11
1.2 Techniques de génération des plasmas non- thermiques à la pression atmosphérique	13
1.2.1 Décharge à faisceaux d'électrons	13
1.2.2 Décharges micro-onde.....	14
1.2.3 Décharges électriques à la pression atmosphérique	15
1.2.3.1 Décharge couronne	15
1.2.3.2 Décharge à barrière diélectrique.....	16
1.2.3.3 Décharge luminescente	17
1.2.3.4 Autres types de décharges	18
1.3 Principe de la formation de décharges contrôlées par barrière diélectrique.....	19
1.3.1 Avalanche électronique	20
1.3.2 Transition avalanche- « streamer » et propagation	21
1.3.3 Canal de décharge	22
1.4 Le plasma atmosphérique dans l'industrie textile	23
1.4.1 Généralités.....	23
1.4.2 Systèmes plasmas atmosphériques utilisés dans l'industrie textile.....	24
1.4.2.1 Système hybride Corona/DBD	24

1.4.2.2	Système DBD	25
1.4.2.3	Systèmes APGD.....	26
1.5	Interactions plasma- surface et modification de surface de fibres et polymères	27
1.5.1	Interactions plasma-surface.....	27
1.5.2	Modification de surface de fibres et polymères par plasma.....	29
1.5.2.1	Le nettoyage de surface.....	29
1.5.2.2	La gravure de surface.....	29
1.5.2.3	La polymérisation plasma.....	30
1.5.2.4	L'activation de surface	30
1.6	Applications des traitements par plasma aux matériaux textiles.....	33
1.6.1	Modification de l'énergie de surface.....	33
1.6.1.1	Obtention des surfaces hydrophiles.....	33
1.6.1.1.1	Fibres naturelles	34
1.6.1.1.2	Fibres artificielles.....	36
1.6.1.1.3	Fibres synthétiques	37
1.6.1.2	Obtention des surfaces hydrophobes	54
1.6.1.2.1	Fibres naturelles	55
1.6.1.2.2	Fibres synthétiques	55
1.6.2	Modifications physiques de surface	57
1.6.2.1	Fibres naturelles	57
1.6.2.2	Fibres artificielles	63
1.6.2.3	Fibres synthétiques.....	63
1.6.3	Amélioration de l'adhésion	69
1.6.3.1	Fibres naturelles	69
1.6.3.2	Fibres artificielles.....	70
1.6.3.3	Fibres synthétiques.....	70
1.6.4	Nettoyage des surfaces	74
1.6.4.1	Fibres naturelles	75
1.6.4.2	Fibres artificielles.....	76
1.6.4.3	Fibres synthétiques.....	79
1.7	Conclusion.....	79

CHAPITRE 2 : OUTILS ET METHODES DE CALCUL UTILISES.....	81
2.1 La logique floue.....	82
2.1.1 Théorie des ensembles flous	82
2.1.1.1 Fonctions d'appartenances	83
2.1.1.2 Variables linguistiques.....	83
2.1.1.3 Opérateurs logiques flous	84
2.1.1.4 Règles floues.....	85
2.1.2 Principes généraux d'une commande par logique floue	86
2.1.2.1 Base de règles et définitions	86
2.1.2.2 Fuzzification.....	87
2.1.2.3 Mécanisme d'inférence.....	87
2.1.2.4 Défuzzification	87
2.1.3 Avantages et inconvénients de la logique floue.....	87
2.1.3.1 Avantages	87
2.1.3.2 Inconvénients	88
2.2 Les réseaux de neurones	88
2.2.1 Les neurones.....	88
2.2.1.1 Le neurone biologique.....	88
2.2.1.2 Le neurone formel.....	89
2.2.2 Architecture des réseaux de neurones	90
2.2.2.1 Les réseaux de neurones non bouclés	90
2.2.2.1.1 Les réseaux à couches	91
2.2.2.1.2 Les réseaux à fonction radiale.....	92
2.2.2.2 Les réseaux bouclés (ou récurrents).....	92
2.2.3 Apprentissage des réseaux de neurones	93
2.2.3.1 Type d'apprentissage	93
2.2.3.1.1 L'apprentissage supervisé	93
2.2.3.1.2 L'apprentissage non supervisé.....	94
2.2.3.2 Algorithme d'apprentissage	94
2.2.4 Propriétés fondamentales des réseaux de neurones non bouclés	96
2.2.4.1 L'approximation universelle	96
2.2.4.2 La parcimonie	97
2.2.4.3 Modélisation statistique.....	98
2.2.5 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones	98

2.2.5.1	Avantages	98
2.2.5.2	Inconvénients	98
2.2.6	Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels.....	99
2.3	Sélection des variables pertinentes	101
2.3.1	Généralités.....	101
2.3.2	Critère de sensibilité numérique.....	104
2.3.3	Critère de sensibilité flou	105
2.4	Conclusion.....	108
CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES.....		110
3.1	Présentation des matériaux	111
3.1.1	Détermination des caractéristiques des tissus	111
3.1.1.1	Détermination de l'armure de tissu	112
3.1.1.2	Détermination du nombre de fils de chaîne et de duites	113
3.1.1.3	Détermination de la masse surfacique.....	113
3.1.1.4	Détermination de la finesse des fibres.....	113
3.1.1.5	Détermination de l'embuvage des fils extrait d'un tissu	114
3.1.1.6	Détermination de la masse linéique (titre) des fils de chaîne et des fils de trame extrait d'un tissu.....	115
3.1.1.7	Détermination de l'épaisseur	115
3.1.1.8	Détermination de la perméabilité à l'air	116
3.1.1.9	Détermination de la rugosité	116
3.1.1.10	Détermination de la porosité.....	117
3.1.1.11	Détermination de la surface totale des fibres	118
3.1.2	Préparation des échantillons.....	121
3.2	Présentation de la machine plasma.....	122
3.3	Méthode d'analyse de surface	123
3.4	Conclusion.....	126
CHAPITRE 4 : ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA STRUCTURE TEXTILE SUR LE TRAITEMENT PAR PLASMA ATMOSPHERIQUE		127
4.1	Fonctionnalisation des tissus par plasma.....	128
4.1.1	Etude de l'oxydation des tissus de PET	128
4.1.1.1	Mouillabilité.....	128
4.1.1.2	Capillarité.....	130
4.1.2	Etude de l'oxydation des tissus de micro-PET.....	132

4.1.2.1	Mouillabilité.....	132
4.1.2.2	Capillarité.....	134
4.1.3	Etude de l'oxydation des tissus de viscose.....	135
4.1.3.1	Mouillabilité.....	135
4.1.3.2	Capillarité.....	136
4.2	Sélection des paramètres pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma	138
4.2.1	Etude « locale »	144
4.2.2	Etude « globale ».....	151
4.3	Discussion.....	153
4.3.1	Effet de la puissance électrique et de la vitesse de traitement	153
4.3.2	Effet de la finesse des fibres.....	156
4.3.3	Effet de la perméabilité à l'air.....	157
4.3.4	Effet de l'armure	160
4.3.5	Effet de la densité des pics	161
4.4	Conclusion.....	163
CHAPITRE 5 : MODELISATION DE LA RELATION PAR RESEAUX DE NEURONES.....		165
5.1	Introduction	166
5.2	Mise en œuvre des réseaux de neurones artificiels.....	166
5.2.1	Choix et préparation de la base de données	167
5.2.1.1	Détermination des entrées du réseau de neurones	167
5.2.1.2	Prétraitement des données.....	167
5.2.1.3	Découpage de la base de données.....	168
5.2.2	Détermination de l'architecture de réseau.....	168
5.2.3	Phase d'apprentissage	170
5.2.3.1	Expression de la fonction de coût	170
5.2.3.2	L'algorithme de Levenberg- Marquardt	171
5.2.3.3	Méthodes pour limiter le sur-apprentissage.....	171
5.2.3.3.1	Arrêt prématuré	172
5.2.3.3.2	Régularisation Bayésienne	173
5.2.4	Généralisation.....	174
5.2.5	Optimisation de l'architecture.....	174
5.2.5.1	Détermination du nombre de neurones pour la couche cachée	175
5.2.5.2	Détermination du nombre d'itérations.....	177

5.2.6	Détermination des performances des modèles	181
5.2.6.1	Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	181
5.2.6.2	Coefficient de corrélation (R)	181
5.2.6.3	Erreur absolue moyenne (MAE)	182
5.2.6.4	Erreur relative absolue moyenne (MRAE).....	182
5.2.7	Récapitulatif	182
5.3	Application au procédé plasma.....	185
5.3.1	Base de données utilisée.....	185
5.3.2	Résultats de l'optimisation de l'architecture des réseaux de neurones	186
5.3.2.1	Nombre de neurones cachés.....	186
5.3.2.2	Nombre d'itérations	189
5.3.3	Comparaison des modèles obtenus	190
5.3.3.1	Apprentissage.....	191
5.3.3.2	Généralisation	196
5.4	Analyse de l'importance des paramètres d'entrée	203
5.4.1	Généralités.....	203
5.4.2	Approche des poids des connexions.....	203
5.4.3	Mise en œuvre	204
5.5	Conclusion.....	211
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....		213
Conclusion.....		213
Perspectives.....		218
BIBLIOGRAPHIE		220
ANNEXES.....		239
Annexe A: Le polyester.....		240
Annexe B: La viscosité.....		245
Annexe C: Angle de contact.....		248
Annexe D: Historique des réseaux de neurones.....		252
Annexe E : Les fonctions d'activation		254

Liste des tableaux

Tableau 1- 1 : Principaux types de collisions inélastiques dans un plasma [REDOLFI, 2007]	12
Tableau 1- 2 : Caractéristiques physiques d'une micro-décharge [LEROUX, 2007]	22
Tableau 1- 3 : Modifications apportés par les constituants de plasma sur la surface des polymères [LEROUX, 2007]	27
Tableau 3- 1 : Les armures fondamentales	112
Tableau 3- 2 : Caractéristiques des différents tissus	119
Tableau 4- 1 : Valeurs minimale et maximale du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface de chaque tissu de PET, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale du $\cos\theta$	130
Tableau 4- 2 : Valeurs minimale et maximale de la hauteur capillaire de chaque tissu de PET, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale de H_{cap}	132
Tableau 4- 3 : Valeurs minimale et maximale du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface de chaque tissu de micro-PET, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale du $\cos\theta$	133
Tableau 4- 4 : Valeurs minimale et maximale de la hauteur capillaire de chaque tissu de micro-PET, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale de H_{cap}	135
Tableau 4- 5 : Valeurs minimale et maximale du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de viscose, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale du $\cos\theta$	136
Tableau 4- 6 : Valeurs minimale et maximale de la hauteur capillaire de chaque tissu de viscose, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale de H_{cap}	137
Tableau 4- 7 : Paramètres d'entrée et de sortie du procédé plasma	139
Tableau 4- 8 : Corrélations entre les variables d'entrée et de sortie du procédé plasma	141
Tableau 4- 9 : Sélection des paramètres pertinents relatifs au cosinus de l'angle de contact par l'algorithme proposé	145
Tableau 4- 10 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la hauteur capillaire des tissus par l'algorithme proposé	145
Tableau 4- 11 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la pente de régression linéaire de la première zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact en fonction de TP, par l'algorithme proposé	146
Tableau 4- 12 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la pente régression linéaire de la première zone des courbes représentant l'évolution de la hauteur capillaire en fonction de TP, par l'algorithme proposé	147
Tableau 4- 13 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la pente de régression linéaire de la deuxième zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact en fonction de TP, par l'algorithme proposé	148

Tableau 4- 14 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la pente de régression linéaire de la deuxième zone des courbes représentant l'évolution de la hauteur capillaire en fonction de TP, par l'algorithme proposé.....	148
Tableau 4- 15 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la constante de régression linéaire de la troisième zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact en fonction de TP, par l'algorithme proposé.....	149
Tableau 4- 16 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la constante de régression linéaire de la troisième zone des courbes représentant l'évolution de la hauteur capillaire en fonction de TP, par l'algorithme proposé.....	150
Tableau 4- 17 : Sélection des paramètres pertinents relatifs au cosinus de l'angle de contact par l'algorithme proposé.....	151
Tableau 4- 18 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la hauteur capillaire des tissus par l'algorithme proposé.....	152
Tableau 4- 19 : Valeurs des TP correspondants à 95 % de la valeur maximale du cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire des différents tissus.....	159
Tableau 5- 1 : Choix faits concernant la construction de l'architecture des réseaux de neurones.....	183
Tableau 5- 2 : Domaine de variations des paramètres d'entrée du procédé plasma.....	185
Tableau 5- 3 : Résultats relatifs au nombre de neurones cachés pour les deux cas d'apprentissage.....	187
Tableau 5- 4 : Résultats relatifs au nombre d'itérations pour les deux cas d'apprentissage.....	189
Tableau 5- 5 : Caractéristiques des modèles obtenus.....	190
Tableau 5- 6 : Performances de deux modèles sur les données d'apprentissage.....	191
Tableau 5- 7 : Performances de deux modèles sur les données de test.....	197
Tableau 5- 8 : Matrice des poids des connexions entrées - neurones cachés de modèle LM204.....	205
Tableau 5- 9 : Matrice des poids des connexions neurones cachés – sortie de modèle LM.....	205
Tableau 5- 10 : Matrice résultante des produits des poids des connexions pour le cosinus de l'angle de contact.....	205
Tableau 5- 11 : Matrice résultante des produits des poids des connexions pour la hauteur capillaire.....	206
Tableau 5- 12 : Résultats de l'approche des poids des connexions pour le modèle LM.....	207
Tableau 5- 13 : Matrice des poids des connexions entrées - neurones cachés de modèle BR.....	210
Tableau 5- 14 : Matrice des poids des connexions neurones cachés – sortie de modèle BR.....	210
Tableau 5- 15 : Résultats de l'approche des poids des connexions pour le modèle BR.....	210
Tableau A- 1 : Production mondiale de Polyester et de Coton entre 1960 et 2001 (en milliers de tonnes).....	240
Tableau A- 2 : Production mondiale de Polyester et de Coton entre 1960 et 2001 (en pourcentage par rapport à la production mondiale totale).....	240
Tableau A- 3 : Propriétés dynamométriques des fibres et fils de PET.....	242
Tableau A- 4 : Classification des fibres de polyester.....	244
Tableau B- 1 : Propriétés dynamométriques des fibres et fils de viscose.....	246
Tableau E- 1 : Différents types de fonctions d'activation.....	255

Liste des figures

Figure 1- 1 : Représentation schématique des quatre états de la matière.....	8
Figure 1- 2 : Diagramme de classification des plasmas	11
Figure 1- 3 : Principe des décharges à faisceaux d'électrons- (1) Electrode de décharge ; (2) Plasma à caractériser ; (3) Electrode grille de protection ; (4) Fenêtre à électrons ; (5) Faisceau d'électrons ; (6) Electrode à très haute tension du canon à électrons	14
Figure 1- 4 : Schéma d'une torche plasma micro-onde [GUAY, 2001]	15
Figure 1- 5 : Décharge couronne lumineuse produite entre des pointes et une électrode plane reliée à la terre	16
Figure 1- 6 : Différentes configurations de décharges à barrière diélectrique	17
Figure 1- 7 : Caractéristiques électriques et photos de l'espace inter-électrodes (a) d'une décharge silencieuse et (b) d'une décharge luminescente [JIMENEZ, 2002].....	18
Figure 1- 8 : Filaments obtenus avec des électrodes carrées de 6cm de coté [GUAITELLA, 2006].....	19
Figure 1- 9 : Schéma décrivant les étapes de la formation d'une micro-décharge filamentaire	20
Figure 1- 10 : Système hybride Corona/DBD [LEROUX, 2007].....	25
Figure 1- 11 : Système DBD [LEROUX, 2007]	26
Figure 1- 12 : Système APGD [LEROUX, 2007].....	26
Figure 1- 13 : Schéma des réactions du contact d'un plasma à la surface d'un polymère (A : groupements latéraux initiaux du polymère et X : nouveau groupement créé) [SARRA-BOURNET, 2007].....	28
Figure 1- 14 : (a) : Représentation des coupures de chaîne d'une macromolécule de PET ; (b) Représentation des réactions d'oxydation du PET.....	31
Figure 1- 15 : Photographie des angles de contacts obtenus à la surface d'un tissu de coton avant et après traitement plasma : (a) surface non traitée ; (b) surface traitée sous air (130 W, 60 secondes) ; et (c) surface traitée sous argon (130 W, 60 secondes) [KARAHAN, 2008] ..	34
Figure 1- 16 : Epuisement d'un bain de teinture (colorant Remazol Brilliant Red GG) en fonction du temps pour un tissu de coton à une température de 40 °C [SUN, 2004]	34
Figure 1- 17 : Epuisement d'un bain de teinture (colorant Neolan Red P) en fonction du temps pour un tissu de laine à une température de 98 °C [SUN, 2004].....	35
Figure 1- 18 : Evolution des angles de contact avec l'eau en fonction du temps de vieillissement pour un substrat de viscose [ZEMPLJIC, 2009]	36
Figure 1- 19 : Taux de rétention d'eau (WRV), capacité d'absorption de liquide (LAC) et temps d'absorption de liquide (LAT) des fibres de viscose avant et après traitement par plasma pendant 5,10 et 15 minutes [VRIC, 2007]	37
Figure 1- 20 : Evolution de l'angle de contact de divers médias en poly(éthylène téréphtalate) en fonction de la puissance de traitement - en noir pour le film ; en gris foncé pour le tissu et en gris clair pour les non-tissés (30 g/m ² : ligne pleine ; 70 g/m ² : ligne discontinue) [LEROUX, 2007].....	38
Figure 1- 21 : Evolution de la capillarité avec l'eau du tissu et non-tissés de PET en fonction de la puissance de traitement - en ligne discontinue le tissu ; en ligne gris le non-tissé de 70 g/m ² et en ligne noir le non-tissé de 30 g/m ² [LEROUX, 2006].....	39

Figure 1- 22 : Hypothèse émise concernant la formation des groupements oxydés pour un matériau ayant A : une forte densité de matière – B : une faible densité de matière [LEROUX, 2007].....	39
Figure 1- 23 : Evolution de l'angle de contact en fonction de la puissance de traitement plasma [TAKKE, 2009]	40
Figure 1- 24 : Evolution de la capillarité de tissu de polyester en fonction de la puissance de traitement (TP) pour des vitesses de 1, 2, 5 et 10 m/min. Pour chaque vitesse, des puissances de 400, 700 et 1000W ont été utilisées [TAKKE, 2009]	40
Figure 1- 25 : Evolution de la capillarité de substrat en microfibres de PET en fonction du temps de traitement par un plasma d'oxygène [KABAJEV, 2004]	41
Figure 1- 26 : Capillarité de substrat en fibres de polyester mesurée (a) directement après traitement plasma et (b) après un mois de vieillissement : 1- temps de traitement plasma 10 min, 2- 2 min, 3- 1 min, 4- 10 secondes et 5- non traité [KABAJEV, 2004]	41
Figure 1- 27 : Evolution de l'hydrophilie du non-tissé de polyester en fonction du temps de traitement plasma [SHIN, 2008]	42
Figure 1- 28 : Evolution de l'hydrophilie du non-tissé de polyester en fonction de la puissance et du temps de traitement [GEYTER, 2006]	43
Figure 1- 29 : Evolution de l'hydrophilie du substrat de polyester en fonction de type du traitement plasma et de la composition du gaz plasmagène [VATUNA, 2004]	44
Figure 1- 30 : Evolution de l'hydrophilie du substrat de polyester en fonction de la puissance de traitement par plasma radiofréquence sous air [VATUNA, 2004].....	44
Figure 1- 31 : Goutte de teinture obtenu à la surface d'un tissu de polyester (a) avant traitement et (b) après traitement par plasma atmosphérique sous un mélange H ₂ -92%/N ₂ [COSTA, 2006]	45
Figure 1- 32 : Evolution de l'hydrophilie de différentes couches en tissu de polyester après traitement plasma en fonction du temps de vieillissement [PICHAL, 2007].....	46
Figure 1- 33 : Images de tissus de polyester ayant une taille moyenne de pores de (a) 200 µm et (b) 100 µm [WANG, 2007a]	46
Figure 1- 34 : Temps d'absorption d'une goutte d'eau sur les deux faces des différentes couches en tissu de polyester présentant une taille moyenne de pores de (a) 100 µm et (b) 200 µm, avant et après traitement plasma [WANG, 2007a].....	47
Figure 1- 35 : Hauteur capillaire des différentes couches en tissu de polyester présentant une taille moyenne de pores de (a) 100 µm et (b) 200 µm, avant et après traitement plasma [WANG, 2007a]	47
Figure 1- 36 : Evolution de la hauteur capillaire des différentes couches en tissu de polyester, présentant une taille moyenne de pores de 200 µm et une épaisseur de 0,25 mm, en fonction du temps de traitement plasma [WANG, 2008a]	48
Figure 1- 37 : Evolution de la capillarité des non-tissés en poly(éthylène téréphtalate) (O, Δ, □) et en méta-aramide (●, ▲, ■) avant nettoyage en fonction du temps de traitement plasma et du nombre de mesures [VERSCHUREN, 2005]	49
Figure 1- 38 : Evolution de la capillarité des non-tissés en poly(éthylène téréphtalate) et en méta-aramide après nettoyage en fonction du temps de traitement plasma et du nombre de mesures [VERSCHUREN, 2005]	49
Figure 1- 39 : Evolution de l'angle de contact d'un non-tissé de polypropylène en fonction du temps de traitement plasma [HWANG, 2005]	51
Figure 1- 40 : Evolution de la hauteur capillaire d'un tissu de polypropylène en fonction de la puissance électrique et du temps de traitement plasma [YAMAN, 2009].....	51
Figure 1- 41 : Evolution de la capillarité des non-tissés (a) aiguilleté et (b) meltblown en fonction du temps [WEI, 2006].....	52

Figure 1- 42 : Evolution de la capillarité de tricot RA/PU en fonction de la pression et de type de gaz plasmagène (1000 W ; 60 secondes) [ROSACE, 2008]	53
Figure 1- 43 : Evolution de la capillarité de tricot RA/PU en fonction de la puissance et de type de gaz plasmagène (0,08 mbar ; 60 secondes) [ROSACE, 2008]	53
Figure 1- 44 : Evolution de la capillarité de tricot RA/PU en fonction du temps de traitement et de type de gaz plasmagène (0,08 mbar ; 1000 W) [ROSACE, 2008]	53
Figure 1- 45 : Goutte d'eau obtenue à la surface d'un tissu de coton après traitement plasma [GOODWIN, 2002].....	55
Figure 1- 46 : Séquences de traitements réalisées sur le tissu de PET [LEROUX, 2007].....	56
Figure 1- 47 : Angles de contact avec l'eau obtenus pour le tissu de PET traité selon les séquences 1 et 2, le chiffre en bas indique le nombre de lavages et les hachures indiquent lorsque la goutte est absorbée en moins d'une minute [LEROUX, 2007]	56
Figure 1- 48 : Photographie des angles de contacts obtenus à la surface d'un tissu de PET (a) avant traitement et (b) après traitement par plasma sous SF ₆ [SUPASAI, 2007].....	57
Figure 1- 49 : Images MEB des fibres de coton (a) non traitées ; (b) traitées sous air (130 W, 60 secondes) ; et (c) traitées sous argon (130 W ; 60 secondes) [KARAHAN, 2008]	58
Figure 1- 50 : Images MEB de surface des fibres de coton (a, b) non traitées ; (c, d) traitées par corona (1000 W ; 45 passages) ; (e, d) traitées par plasma radiofréquence sous argon (300 W ; 15 min) ; (g, h) traitées par plasma radiofréquence sous air (300 W ; 15 min) [RADETIC, 2009].....	59
Figure 1- 51 : Rugosité de surface de (a) coton et de (b) laine obtenue avant et après traitement plasma sous O ₂ et C ₂ F ₆ [SUN, 2006].....	60
Figure 1- 52 : Rugosité de surface de (a) coton et de (b) laine obtenue avant et après traitement plasma sous C ₂ F ₆ en fonction de débit du gaz [SUN, 2006].....	60
Figure 1- 53 : Images MEB des fibres de laine (a) non traitées et (b) traitées par plasma sous dioxygène pendant 5 minutes [KAN, 1999].....	61
Figure 1- 54 : Images MEB des fibres de laine (a) non traitées et (b) traitées par plasma atmosphérique sous air [KULYK, 2008]	61
Figure 1- 55 : Images MEB des fibres de laine (a) non traitées; (b) traitées par plasma sous air/hélium pendant 3 min; (c) traitées par plasma sous oxygène/ hélium pendant 3 min [CAI, 2006a].....	62
Figure 1- 56 : Images MEB des fibres de viscose (a) non traitées ; (b) traitées sous dioxygène ; (c) traitées sous hydrogène ; et (d) traitées sous azote [VESEL, 2010]	63
Figure 1- 57 : Images MEB des fibres de poly(éthylène téréphtalate) traitées par plasma sous azote à une fréquence de (a) 0,05 kHz ; (b) 5 kHz; et (c) 100 kHz, pendant 4 minutes [WROBEL, 1978]	64
Figure 1- 58 : Images MEB des filaments de polyester (a) non traités ; (b) traités sous O ₉₀ N ₉ H ₁ ; (c) traités sous N ₉₂ H ₈ ; (d) traités sous O ₁₀ N ₈₃ H ₇ [COSTA, 2006].....	64
Figure 1- 59 : Images MEB des fibres de polyester (a) non traitées et (b) traitées par plasma sous un mélange argon/dioxygène pendant 1 min [ZHONGFU, 2007].....	65
Figure 1- 60 : Images topographiques des fibres de polyester (a) avant traitement et (b) après traitement à une puissance de 60 kJ/m ² [LEROUX, 2006].....	65
Figure 1- 61 : Rugosité de surface de différentes couches du substrat en PET [WANG, 2008]	66
Figure 1- 62 : Images MEB de (a) tissu de PET non traité ; (b) couche 1 ; (c) couche 2 ; (d) couche 3 et (e) couche 4 de substrat de PET traité par un plasma sous hélium/dioxygène pendant 2 secondes [WANG, 2007].....	67
Figure 1- 63 : Coupe transversale des fibres de laine imprégnées avec une solution de pyrrole (a) avec traitement plasma et (b) sans traitement plasma [GARG, 2007].....	70

Figure 1- 64 : Force d'adhésion entre la résine siliconée avec primaire d'adhésion et le tissu de poly(éthylène téréphtalate) mesurée grâce à des tests de pelage à 180° [LEROUX, 2006]	71
Figure 1- 65 : Evolution de la force de rupture des non-tissés 30 g/m ² imprégnés par le silicone avec primaire d'adhésion en fonction de la puissance de traitement (TP) [LEROUX, 2007].....	71
Figure 1- 66 : Evolution de la résistance apparente au cisaillement (IFSS) de la liaison fibre de polyéthylène/résine époxyde en fonction de la température et de la puissance de traitement [WANG, 2008b]	72
Figure 1- 67 : Vue transversale des fibres de polyester traitées par plasma et imprégnées avec une solution de pyrrole [GARG, 2007].....	73
Figure 1- 68 : Images des non-tissés de polypropylène imprégnés avec une solution de Fe ₂ O ₃ (a) sans traitement plasma et (b) avec traitement plasma sous air [CERNAKOVA, 2007].....	73
Figure 1- 69 : Images des non-tissés de polypropylène imprégnés avec une solution de Fe ₂ O ₃ et lavés (a) sans traitement plasma et (b) avec traitement plasma sous air [CERNAKOVA, 2007].....	74
Figure 1- 70 : Taux d'élimination du PVA (PDR) d'un tissu de coton suivant le traitement [CAI, 2006b]	75
Figure 1- 71 : Images MEB des fibres de laine (a) non traitées et (b) traitées par plasma sous air [KULYK, 2008].....	76
Figure 1- 72 : Taux d'élimination du PVA (PDR) d'un tissu de viscose suivant le traitement : 0- lavage ; 1- traitement plasma sous air/O ₂ /He pendant 30 s + lavage ; 2- traitement plasma sous air/O ₂ /He pendant 2 min + Lavage ; 3- traitement plasma sous air/O ₂ /He pendant 5 min + lavage ; 5- traitement plasma sous air/He pendant 2 min + lavage ; 6- traitement plasma sous air/He pendant 5 min + lavage [CAI, 2003b].....	77
Figure 1- 73 : Images MEB des fibres de viscose (1) non traitées ; (2) après encollage ; (3) après encollage + lavage ; (4) après encollage + traitement plasma sous air/O ₂ /He pendant 30 s + lavage ; (5) après encollage + traitement plasma sous air/O ₂ /He pendant 2 min + lavage ; (6) après encollage + traitement plasma sous air/O ₂ /He pendant 5 min + lavage [CAI, 2003b]	78
Figure 1- 74 : Images MEB des fibres de PET (a) avant traitement plasma ; (b) après traitement plasma sous O ₂ pendant 5 minutes ; (c) après traitement plasma sous O ₂ pendant 20 minutes [BAE, 2006].....	79
Figure 2- 1 : Variable linguistique <i>Taille</i> [CAO, 1997].....	84
Figure 2- 2: Fonction d'appartenance du complément d'un sous-ensemble flou <i>A</i>	85
Figure 2- 3 : Structure conventionnelle d'une commande floue [CAO, 1997].....	86
Figure 2- 4 : Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel [TOUZET, 1992]	89
Figure 2- 5 : Exemple de réseau de neurones non bouclé à une couche de neurones cachés [RIVALS, 1996].....	91
Figure 2- 6 : Réseau de neurones non bouclé complètement connecté [RIVALS, 1995]	92
Figure 2- 7 : Forme canonique d'un réseau de neurones bouclé [RIVALS, 1996]	93
Figure 2- 8 : Réseau de neurones artificiel à n variables d'entrée et deux sorties, utilisé en modélisation statistique non linéaire vis-à-vis des paramètres, par apprentissage non bouclé	101
Figure 2- 9 : Modèle flou de sensibilité	105
Figure 2- 10 : Valeurs floues pour Δx et Δy	106
Figure 2- 11 : Valeurs floues pour <i>SF</i>	106

Figure 3- 1 : Appareil Vibroskop (Zweigle)	114
Figure 3- 2 : Appareil SODEMAT	116
Figure 3- 3 : Appareil TEXTTEST FX3300	116
Figure 3- 4 : Profilomètre optique (Cotec, Altisurf 500)	117
Figure 3- 5 : Images des différents tissus obtenues par microscopie optique (agrandissement x10).....	120
Figure 3- 6 : Tensiomètre	121
Figure 3- 7 : Représentation d'une mesure de la tension de surface par la méthode de Wilhelmy	121
Figure 3- 8 : Schématisation de la machine de traitement plasma	123
Figure 3- 9 : La machine plasma « Coating Star » (AHLBRANDT SYSTEM).....	123
Figure 3- 10 : La « BALANCE 3S ».....	124
Figure 3- 11 : Schématisation du fonctionnement de la « BALANCE 3S ».....	124
Figure 3- 12 : Courbe théorique du mouillage	125
Figure 4- 1 : Evolution du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de PET en fonction de la puissance de traitement plasma	129
Figure 4- 2 : Evolution de la hauteur capillaire des tissus de PET en fonction de la puissance de traitement plasma.....	131
Figure 4- 3 : Evolution du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de micro-PET en fonction de la puissance de traitement plasma	133
Figure 4- 4 : Evolution de la hauteur capillaire des tissus de micro-PET en fonction de la puissance de traitement plasma	134
Figure 4- 5 : Evolution du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de viscose en fonction de la puissance de traitement plasma	135
Figure 4- 6 : Evolution de la hauteur capillaire des tissus de viscose en fonction de la puissance de traitement plasma	137
Figure 4- 7 : Mise en évidence de différentes zones des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire en fonction de TP, pour les tissus de PET	142
Figure 4- 8 : Mise en évidence de différentes zones des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire en fonction de TP, pour les tissus de micro-PET et de viscose.....	143
Figure 4- 9 : Variations du cosinus de l'angle de contact en fonction de la puissance de traitement plasma	154
Figure 4- 10 : Variations de la hauteur capillaire en fonction de la puissance de traitement plasma.....	154
Figure 4- 11 : Cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de PET et micro-PET en fonction de la finesse des fibres (TP = 60 kJ/m ²).....	156
Figure 4- 12 : Hauteur capillaire des tissus de PET et micro-PET en fonction de la finesse des fibres (TP = 60 kJ/m ²)	157
Figure 4- 13 : Variations du cosinus de l'angle de contact en fonction de la perméabilité à l'air et de la puissance de traitement (TP) (0 ; 3,6 and 12 kJ/m ²)	158
Figure 4- 14 : Evolution de la pente du cosinus de l'angle de contact en fonction de la perméabilité à l'air des différents tissus (TP = 3,6 kJ/m ²)	159
Figure 4- 15 : Hauteur capillaire en fonction de l'armure des différents tissus (TP = 60 kJ/m ²)	161
Figure 4- 16 : Variations du cosinus de l'angle de contact en fonction de la densité des pics des différents tissus (TP = 60 kJ/m ²).....	162

Figure 4- 17 : Variations du cosinus de l'angle de contact en fonction de la rugosité des différents tissus ($TP = 0 \text{ kJ/m}^2$)	163
Figure 5- 1 : Structure d'un réseau de neurone à trois couches (W_{ij} étant le poids des connexions entre les neurones d'entrée et cachés, W_{jk} le poids des connexions les neurones cachés et de sortie)	169
Figure 5- 2: Evolution schématique de l'erreur sur les sous-ensembles d'apprentissage et de validation en fonction du nombre d'itérations	172
Figure 5- 3 : Organigramme pour la détermination du nombre optimal de neurones cachés	179
Figure 5- 4 : Organigramme pour la détermination du nombre optimal d'itérations.....	180
Figure 5- 5 : Processus d'optimisation.....	184
Figure 5- 6 : Architecture du réseau de neurones obtenu en utilisant la technique d'arrêt prématuré.....	188
Figure 5- 7 : Architecture du réseau de neurones obtenu en utilisant la technique de régularisation Bayésienne	188
Figure 5- 8 : (a) Valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact et erreur de prédiction sur l'ensemble d'apprentissage pour le modèle LM ; (b) Diagramme de parité correspondant	192
Figure 5- 9 : (a) Valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact et erreur de prédiction sur l'ensemble d'apprentissage pour le modèle BR ; (b) Diagramme de parité correspondant	193
Figure 5- 10 : (a) Valeurs mesurées et prédites de la hauteur capillaire et erreur de prédiction sur l'ensemble d'apprentissage pour le modèle LM ; (b) Diagramme de parité correspondant	194
Figure 5- 11: (a) Valeurs mesurées et prédites de la hauteur capillaire et erreur de prédiction et sur l'ensemble d'apprentissage pour le modèle BR ; (b) Diagramme de parité correspondant	195
Figure 5- 12 : (a) Valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact et erreur de prédiction sur l'ensemble de test pour le modèle LM ; (b) Diagramme de parité correspondant	198
Figure 5- 13 : (a) Valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact et erreur de prédiction sur l'ensemble test pour le modèle BR ; (b) Diagramme de parité correspondant	199
Figure 5- 14 : (a) Valeurs mesurées et prédites de la hauteur capillaire et erreur de prédiction sur l'ensemble de test pour le modèle LM ; (b) Diagramme de parité correspondant.....	200
Figure 5- 15 : (a) Valeurs mesurées et prédites de la hauteur capillaire et erreur de prédiction sur l'ensemble de test pour le modèle BR ; (b) Diagramme de parité correspondant.....	201
Figure 5- 16 : Variations de la hauteur capillaire en fonction de la densité des pics des différents tissus ($TP = 60 \text{ kJ/m}^2$).....	208
Figure A- 1 : Formule chimique du monomère du PET	241
Figure C- 1: Forces appliquée sur une goutte d'eau déposée sur un support solide.....	248
Figure C- 2 : Angle de contact d'un liquide avec un solide. Pour $\theta < 90^\circ$, le liquide mouille la paroi, pour $\theta > 90^\circ$, le liquide ne mouille pas la surface. Si $\theta = 0^\circ$, la mouillabilité de liquide pour cette surface est totale	249

Introduction générale

La production et l'utilisation des matériaux polymères synthétiques et artificiels ont considérablement évolué dans les dernières décennies. Cette forte demande est principalement due à leurs disponibilités dans une grande variété de composition chimique et de propriétés physiques. Ces matériaux offrent de bien meilleures performances que les fibres naturelles mais, ils ne présentent pas souvent les propriétés de surface satisfaisantes pour être utilisés sans modification préalable. En effet, la plupart de ces fibres présentent une surface relativement hydrophobe, ce qui entrave certaines applications comme par exemple la teinture, l'adhésion avec d'autres matériaux, etc. Il est donc nécessaire d'effectuer une étape de traitement de surface pour augmenter leur énergie de surface et améliorer ainsi leurs propriétés hydrophiles. De ce fait, différentes méthodologies ont été développées et considérées pour modifier les propriétés de surfaces des polymères [DARQUE-CERETTI, 2003].

Les procédés d'hydrophilisation de surface les plus couramment utilisés sont des traitements avec des agents tensio-actifs, une greffe, un mélange ou un dépôt de revêtement avec des polymères hydrophiles, et autres similaires [UYAMA, 1998]. Ces traitements offrent

des performances appréciables. Cependant, ils sont souvent indésirables en matière de réglementation environnementale puisqu'ils utilisent de grandes quantités d'eau, de solvants et d'autres produits chimiques qui sont dangereux et polluants pour l'environnement. Pour pallier à ce problème, l'industrie textile a commencé d'intégrer d'autres techniques plus avantageuses économiquement et écologiquement. On compte parmi ces techniques, l'irradiation ionique [CHO, 2003], le traitement corona [XU, 2003], les rayonnements UV ou laser [THOMAS, 1992], et également les traitements par plasmas froids [BORCIA, 2007], [KANG, 1999], [MOON, 2009], ces derniers étant le principal sujet de ce mémoire.

Les plasmas froids constituent en effet des milieux gazeux partiellement ionisés, globalement neutre et hautement réactifs. Ils sont utilisés pour le traitement de surface, car ils permettent de transformer l'énergie électrique en énergie chimique en dissociant les molécules. Ils contiennent aussi non seulement des radicaux et des atomes réactifs mais aussi des ions qui peuvent être accélérés par un champ électrique appliqué pour bombarder les surfaces [BOGAERTS, 2002].

Sur le plan scientifique et technologique, les propriétés physico-chimiques induites par plasma ont suscité l'intérêt des communautés scientifiques et industrielles depuis les années soixante. En fait, cette nouvelle technologie a connu un essor considérable dans de nombreux domaines tels que la microélectronique, la gravure et la métallurgie. Ces avancées ont éveillé ces dernières années un intérêt croissant dans le secteur textile [SHARNINA, 2004].

Bien entendu, les techniques à base de plasma constituent une catégorie des procédés privilégiés pour l'industrie textile étant donné qu'elles se basent sur des procédés physiques qui semblent plus avantageux- notamment sur le plan environnemental- que les procédés chimiques liquides classiques [NASADIL, 2008], [RADETIC, 2007], [MORENT, 2008]. En effet, les traitements se réalisent à sec sans recours à des solutions chimiques. Ceci permet d'éviter à la fois la consommation importante des ressources en eau, les coûts de retraitement des effluents ainsi que l'énergie utilisée pour le chauffage des bains et le séchage des fibres traitées. En outre, ces traitements sont capables de modifier considérablement les propriétés physiques de surface sans affecter les propriétés intrinsèques du matériau traité. Un autre avantage important de ces traitements est qu'ils peuvent être contrôlés facilement par ajustement des paramètres indépendants qui influencent les propriétés du plasma. Ces technologies conduisent à de très nombreuses applications incluant le nettoyage, l'activation de surface, la gravure et la polymérisation.

En pratique, divers techniques de traitement de surface par plasma ont été développées. Néanmoins, leur implantation dans le milieu industriel a été bridée par le fait qu'elles fonctionnent à basse pression. En fait, ces techniques requièrent nécessairement un système à vide qui rend le traitement coûteux et peu pratique : le traitement d'un seul échantillon peut prendre plusieurs heures dû au temps de pompage pour obtenir le vide nécessaire, ce qui n'en fait pas un procédé idéal pour étendre la technique à une échelle industrielle.

Le développement ultérieur des systèmes fonctionnant à la pression atmosphérique a permis de résoudre ce problème. Il est désormais possible d'effectuer des traitements à grande échelle qui soient économiques et compatibles avec une production en ligne [SHENTON, 2001]. En dépit de ces avantages, le plasma est à l'heure actuelle très peu utilisé dans le secteur textile. L'adaptation de cette nouvelle technologie requiert une meilleure compréhension des mécanismes qu'elle implique ce qui n'est pas encore atteint. En effet, la littérature scientifique a traité ce sujet mais en ordre dispersé sans une étude systématique. Toutefois, les recherches portant sur le potentiel des plasmas à pression atmosphérique pour le traitement de surface des matériaux textiles sont encore d'actualité.

Dans ce contexte d'innovation et de respect pour l'environnement, le laboratoire GEMTEX (Génie et Matériaux TEXtiles) est équipé d'une unité de traitement par plasma appelée la « Coating Star » qui est manufacturée par l'entreprise AHLBRANDT SYSTEM (Allemagne). Cette machine offre des possibilités de traitement à pression atmosphérique, avec comme gaz plasmagène, l'air ambiant. Il s'agit d'une technologie peu onéreuse et écologiquement propre car elle ne nécessite pas ni d'apports gazeux ni aqueux. De plus, elle permet de réaliser des traitements à la continue qui permettent un gain de temps important pour les industriels.

Des travaux de recherche antérieurs, portant sur cette machine, ont été menés au laboratoire par Frédéric Leroux [LEROUX, 2007] dont la thèse doctorale a pour objectif d'étudier l'impact du traitement plasma atmosphérique sur différents matériaux en poly(éthylène téréphtalate) (film, non-tissés, tissu). Ces travaux ont montré que le traitement plasma atmosphérique des matériaux textiles est faisable et efficace.

La thèse présentée ici se situe dans la continuité de cette première étude. En fait, nous nous intéressons dans ce travail à étudier l'impact des traitements par plasma à pression atmosphérique sous air sur différents tissus en polyester et en viscose. Bien entendu, les matériaux en polyester ont déjà fait l'objet de nombreuses études permettant d'analyser leurs propriétés de surface après le traitement plasma. La majorité de ces travaux a porté très

logiquement sur la caractérisation des modifications de surface, au sens général du terme. Mais, peu d'études approfondies ont été réalisées sur l'influence des paramètres du procédé plasma sur les résultats du traitement. Ainsi, **l'originalité de notre travail de recherche réside donc dans le fait d'associer une analyse rigoureuse portant sur la sélection des paramètres les plus pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma afin de mieux appréhender leur influence sur les modifications de surface apportées par le traitement plasma d'une part, et de réduire la complexité de la modélisation de ce procédé d'autre part. Parmi les propriétés de surface, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'énergie de surface.**

Le travail de cette thèse est divisé en deux grandes parties. La première consiste à étudier l'impact de la structure textile sur le traitement plasma. Pour se faire, nous allons utiliser une méthode de sélection de variables utilisant la logique floue afin d'identifier les paramètres les plus pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma. Cette méthode, développée par Deng et al. [DENG, 2006], [DENG, 2007], consiste tout d'abord à calculer les distances entre les échantillons individuels dans l'espace d'entrée et celles dans l'espace de sortie. Ensuite, en s'appuyant sur les distances calculées, elle utilise des règles floues pour évaluer la sensibilité des variables soumises à la variation dans l'espace d'entrée par rapport à celles répercutées dans l'espace de sortie. La logique floue est utilisée en raison de sa souplesse, robustesse et adaptabilité aux incertitudes et imprécisions. De ce fait, la présente étude va permettre de mieux comprendre l'influence des paramètres sélectionnés sur la mouillabilité et la capillarité des tissus, en vue d'une optimisation de traitement. La sélection de données fiables constitue donc une étape importante pour extraire de la connaissance sur le procédé plasma et construire des modèles de prédiction.

La seconde partie est consacrée au développement des modèles à base de réseaux de neurones afin de prédire la relation entre les paramètres pertinents sélectionnés des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma (paramètres d'entrée) et les propriétés spécifiques recherchées (paramètres de sortie). Les réseaux de neurones ont été choisis en raison de leur capacité d'apprentissage de données, leur robustesse et leur adaptabilité aux données bruitées ou manquantes. En fait, ces réseaux de neurones présentent ces dernières années un sujet d'actualité et de recherche très en vogue. Ils sont appliqués, avec succès, à la modélisation de nombreux systèmes industriels dans lesquels les relations entre les variables d'entrée et de sortie sont complexes et les règles de fonctionnement sont inconnues.

Pour élaborer les modèles neuronaux, deux techniques de régularisation vont être considérées afin de limiter le phénomène de sur-apprentissage. De même, une procédure va être proposée pour optimiser l'architecture des réseaux de neurones. En outre, une approche basée sur les poids des connexions va être utilisée afin d'analyser l'importance relative des paramètres d'entrée sur chacune des sorties.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre consiste en un état de l'art de traitement des matériaux textiles par plasma. Il présente tout d'abord des généralités sur les plasmas et leur génération. Ensuite, il décrit le principe de formation des décharges par barrière diélectrique ainsi que les machines de traitement plasma atmosphérique les plus rencontrées dans l'industrie textile. Il détaille également les interactions plasma-surface et les modifications de surface engendrées par les traitements plasma. Enfin, il présente une synthèse des travaux publiés dans la littérature sur les traitements plasma des matériaux textiles.

Le second chapitre décrit les outils de calcul utilisés pour la sélection des paramètres pertinents afin de mieux comprendre le procédé plasma et de réduire la complexité de la modélisation de ce procédé. Il présente d'abord les notions de base sur la logique floue et les réseaux de neurones. Ensuite, il aborde des généralités sur les méthodes de sélection de variables. Enfin, il présente en détails la méthode de sélection adoptée pour sélectionner les paramètres pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma.

Le troisième chapitre s'attarde sur la description du dispositif expérimental employé. Il décrit, dans un premier temps, les méthodes expérimentales normalisées utilisées pour déterminer les différentes caractéristiques des tissus étudiés. Il présente ensuite la machine utilisée pour la réalisation des traitements plasma sous air. Enfin, il décrit la méthode d'analyse de surface utilisée pour caractériser la mouillabilité et la capillarité des tissus.

Le quatrième chapitre se focalise sur l'étude de l'impact de la structure textile sur le traitement par plasma. Il présente dans un premier temps les résultats relatifs à la fonctionnalisation des tissus de polyester et de viscose par plasma. Ensuite, il illustre les résultats de sélection des paramètres pertinents obtenus en utilisant le critère de sensibilité floue. Enfin, il entame une analyse et discussion des résultats obtenus.

Le cinquième et dernier chapitre porte sur l'utilisation des réseaux de neurones pour modéliser la relation entre les paramètres sélectionnés des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma (paramètres d'entrée) et les propriétés spécifiques recherchées

(paramètres de sortie). Il décrit tout d'abord les étapes de la mise en œuvre des modèles de réseaux de neurones. Il présente également les méthodes utilisées pour éviter le sur-apprentissage ainsi que les algorithmes développés pour déterminer le nombre optimal de neurones cachés et d'itérations. Ensuite, il expose les résultats obtenus par l'application de la méthodologie suivie au procédé plasma. Enfin, il présente une analyse de la contribution des paramètres d'entrée sur la prédiction des modèles neuronaux.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale rassemblant une synthèse des résultats et une présentation des perspectives à envisager lors d'études complémentaires.

Chapitre 1 : Etat de l'art sur le traitement des matériaux textiles par plasma

Dans ce chapitre, nous définirons tout d'abord l'état plasma en général ainsi que ses propriétés physiques importantes pour le décrire. Puis, les différentes techniques de génération des plasmas non-thermiques à la pression atmosphériques ainsi que le principe de formation des décharges par barrière diélectrique seront abordés. Ensuite, les machines de traitement plasma à pression atmosphérique les plus souvent utilisées dans l'industrie textile seront présentées. De même, les interactions plasma- surface ainsi que les modifications de surface engendrées par les traitements plasma seront détaillées. Enfin, les travaux publiés dans la littérature concernant le traitement des matériaux textiles par plasma seront synthétisés afin de donner une idée des traitements pouvant être effectués avec les traitements plasma.

1.1 Généralités sur les Plasmas

1.1.1 Définitions

Le terme "plasma" a été introduit en physique en 1926 par le physicien Irving Langmuir pour désigner, dans les tubes à décharges, certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre. Les propriétés uniques des plasmas ont amené les scientifiques à nommer le plasma le « quatrième état de la matière », faisant suite dans l'échelle des températures aux trois états classiques : solide, liquide et gaz (Figure 1-1).

Un plasma est donc défini comme étant un gaz partiellement ou totalement ionisé constitué de particules chargées, d'électrons, d'ions, de radicaux libres et de radiations ultra-violet telle que cet ensemble soit globalement électriquement neutre.

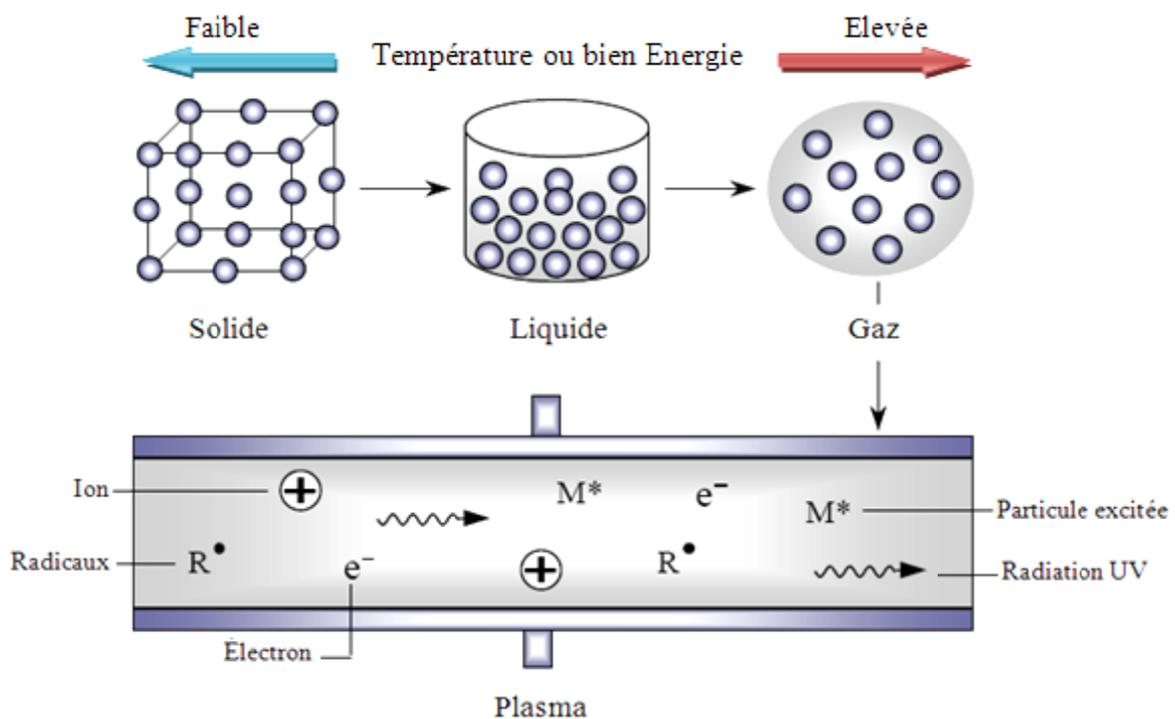


Figure 1- 1 : Représentation schématique des quatre états de la matière

Plus de 99 % de l'univers visible est constitué de plasma de différents types, mais l'état de plasma apparaît rarement naturellement à la surface de la terre. Cependant, on le produit artificiellement en appliquant des champs électriques suffisamment puissants pour séparer le noyau de ses électrons dans les gaz. Les caractéristiques uniques de plasmas sont devenues vitales pour nombre d'applications de la vie quotidienne

1.1.2 Grandeurs caractéristiques

Les plasmas sont caractérisés principalement par les paramètres suivants : le libre parcours moyen, la température électronique, la densité des espèces, le taux d'ionisation et la longueur de Debye.

1.1.2.1 Libre parcours moyen

Le libre parcours moyen λ correspond à la distance moyenne parcourue par une particule (électron, ion, neutre, etc.) entre deux collisions. Ce paramètre dépend de la vitesse des particules, ainsi que de la probabilité de collision [LABERGUE, 2005]. Il peut généralement être décrit par l'Equation 1-1.

$$\lambda = \frac{1}{\pi(r_1+r_2)^2 \times N_p} \quad (1-1)$$

où r_1 et r_2 sont les rayons de particules en collision et N_p la densité des particules (nombre de particules par unité de volume) [SARRA-BOURNET, 2007].

1.1.2.2 Température électronique

La température électronique T_e désigne la température des électrons. Elle est souvent considérée la plus importante, par comparaison aux autres températures (ionique, gaz,...), pour déterminer et démontrer les phénomènes dans le plasma puisque les électrons sont les agents les plus actifs pour l'ionisation du gaz et la création des radicaux [SARRA-BOURNET, 2007]. Pour des systèmes à l'équilibre, cette température est reliée à l'énergie cinétique moyenne par l'Equation 1-2 [TENDERO, 2005].

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{3}{2} k T_e \quad (1-2)$$

où m_e est la masse des électrons, v la vitesse moyenne des électrons et k la constante de Boltzmann ($k=1,38 \cdot 10^{23}$ J/K).

1.1.2.3 Densité des espèces et taux d'ionisation

La densité n est définie comme le nombre de particules par unité de volume (cm^{-3}), et ce pour chaque espèce (électrons, ions, neutres) [TENDERO, 2005]. Un paramètre intéressant pour caractériser le plasma est son taux d'ionisation α [LERIDE, 2006]. Ce dernier représente

le rapport du nombre d'électrons libres n_e sur le nombre de particules totales $n_e + n_n$, où n_n est le nombre de particule neutre par unité de volume (Equation 1-3).

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_n} \quad (1-3)$$

1.1.2.4 Longueur de Debye

La longueur de Debye λ_D définit la longueur à partir de laquelle le champ électrique Coulombien issue d'une particule chargée est neutralisé par un ensemble de particules de signes opposées dans le volume environnant. En d'autres termes, elle caractérise le volume (sphère de Debye) dans lequel un écart à la neutralité peut se produire [LERIDE, 2006]. L'expression de ce paramètre est donnée par l'Equation 1-4.

$$\lambda_D = \left(\frac{2\varepsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^2 \quad (1-4)$$

où ε_0 est la permittivité du vide ($8,84 \cdot 10^{-12}$ F/m) et e la charge élémentaire d'un électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) [LABERGUE, 2005].

1.1.3 Classification

A partir des paramètres présentés dans le paragraphe précédent, il est possible de distinguer et de classer les différents plasmas. La Figure 1-2 propose une classification des différents plasmas en fonction de la température électronique et de la densité de particules chargées. Cette classification permet alors de ressortir trois catégories de plasmas : les plasmas chauds, les plasmas thermiques et les plasmas non-thermiques.

1.1.3.1 Les plasmas chauds

La température de ce type de plasma est de l'ordre de quelques millions de degrés et correspond généralement aux plasmas stellaires (soleil,...). Le taux d'ionisation de ces plasmas est proche de 100 %. Nous trouvons ce type de plasma dans le domaine de la fusion thermo- nucléaire.

1.1.3.2 Les plasmas thermiques

Ces plasmas sont caractérisés par une température égale pour toutes les espèces (électrons, ions, molécules) de quelques milliers de degrés, par une densité énergétique élevée et par un

taux d'ionisation inférieur à 100 %. Leurs applications sont la soudure à arcs électriques, la projection de matière, etc.

1.1.3.3 Les plasmas non-thermiques ou plasmas froids

Dans ce type de plasma, la température des ions et des neutres, proche de la température ambiante, est bien inférieure à celle des électrons (10^4 - 10^5 K). De plus, la densité d'énergie et le taux d'ionisation sont plus faibles que dans le cas des plasmas thermiques. Les électrons peu nombreux mais énergétiques permettent donc d'obtenir une chimie très efficace tout en gardant le gaz à température ambiante [GUAITELLA, 2006]. Ces plasmas sont utilisés dans l'industrie pour le traitement de surface, la dépollution, la génération d'ozone, l'éclairage, etc.

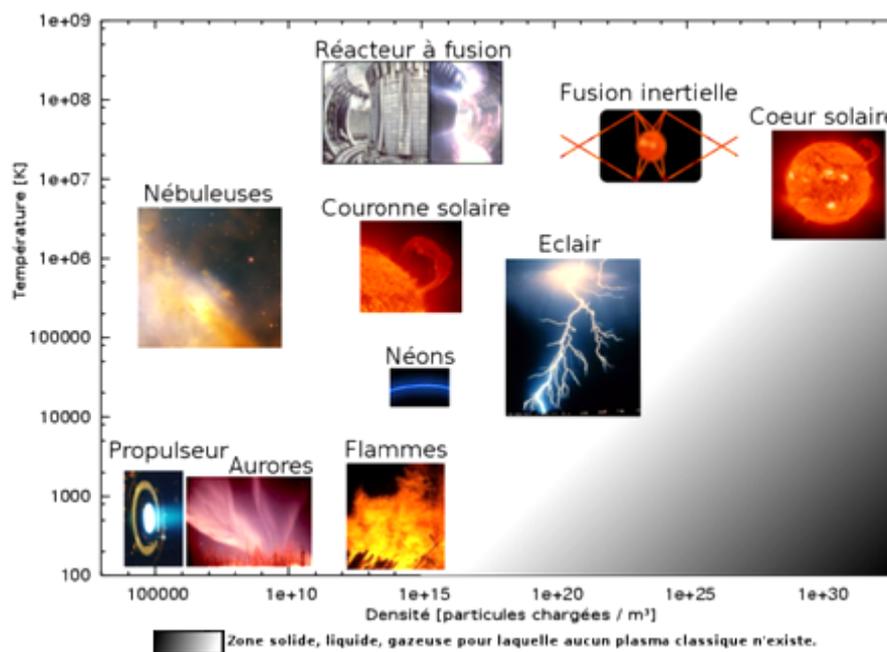


Figure 1- 2 : Diagramme de classification des plasmas

1.1.4 Phénomènes de collision

Lors de leur mouvement, qu'il soit dû à leur agitation thermique où à un phénomène de transport tel que la convection ou la dérive dans un champ électrique, les particules d'un gaz entrent en collision. C'est de ces collisions que se découle la formation des espèces réactives de plasma.

Il existe en réalité deux types de collision [MATEO-VELEZ, 2006], [REDOLFI, 2007]:

- ✓ Les collisions élastiques, où les particules sont déviées avec un échange de quantité de mouvement et d'énergie cinétique.
- ✓ Les collisions inélastiques, où un échange d'énergie se produit au niveau des modes internes de particules. Les électrons cèdent une partie de leur énergie cinétique et engendrent des processus d'excitation, de dissociation, d'ionisation et d'attachement.

Les collisions inélastiques sont donc la source d'un nombre important de réaction physico-chimiques qui vont alors modifier les propriétés macroscopiques de gaz [LABERGUE, 2005]. Le Tableau 1-1 présente les principales collisions inélastiques produisant dans un plasma.

Excitation	par particule	$A + B \rightarrow A^* + B$
	par photon	$A + h\nu \rightarrow A^*$
	par électron	$A + e^- \rightarrow A^* + e^-$
	par transfert	$A + B^* \rightarrow A^* + B$
Désexcitation radiative		$A^* \rightarrow A + h\nu$
Ionisation	par particule lourde	$A + B \rightarrow A^+ + B + e^-$
	par photon	$A + h\nu \rightarrow A^+ + e^-$
	par attachement	$A + e^- \rightarrow A^-$
Transfert de charge		$A + B^+ \rightarrow A^+ + B$
Dissociation	par particule lourde	$A_2 + B \rightarrow A + A + B$
	par photon	$A_2 + h\nu \rightarrow A + A$
	par électron	$A_2 + e^- \rightarrow A + A + e^-$
Recombinaison	entre atomes	$B + A + A \rightarrow B + A_2$
	Recombinaison radiative	$e^- + A^+ \rightarrow A + h\nu$
	neutralisation ionique	$A^- + B^+ \rightarrow AB$
	entre radicaux	$R + H \rightarrow RH$
	ion/molécule	$A^+ + B \rightarrow AB^+$

Tableau 1- 1 : Principaux types de collisions inélastiques dans un plasma [REDOLFI, 2007]

Dans le cadre de ces travaux, nous nous intéressons au cas de plasmas d'air. Ce type de plasma a fait l'objet de nombreuses études. L'air ambiant peut être considéré comme un mélange de $N_2/O_2/H_2O$ avec des proportions 79/20/1 [LEROUX, 2007]. Les processus de collisions les plus importants dans ce cas sont : l'excitation des modes vibrationnelles de l'azote, la dissociation de l'oxygène et de l'azote, l'attachement dissociatif sur l'oxygène et l'azote, l'ionisation de l'azote et de l'oxygène, la neutralisation mutuelle entre ions positifs et négatifs et la recombinaison électron-ion [REDOLFI, 2007].

Dans cette première partie, nous avons donné un aperçu sur les caractéristiques fondamentales et les phénomènes de collision dans les plasmas. Dans la partie suivante, nous proposons d'aborder les techniques de génération des plasmas non-thermiques à la pression atmosphériques.

1.2 Techniques de génération des plasmas non- thermiques à la pression atmosphérique

Les plasmas non- thermiques peuvent être générés par trois principales technologies : l'irradiation par faisceaux d'électrons, le rayonnement micro-onde et les décharges électriques.

1.2.1 Décharge à faisceaux d'électrons

Le principe des décharges à faisceaux d'électrons (Figure 1-3) consiste à générer un faisceau d'électrons monocinétiques hautement énergétiques (100 keV à 1 MeV) dans une chambre sous très basse pression ($< 10^{-4}$ mbar), puis, les injecter dans le gaz cible à travers une fenêtre de faible épaisseur constituée d'un feuillet métallique le plus souvent en titane, qui sépare la zone sous vide du gaz à la pression atmosphérique. Les électrons primaires, qui sont produit par un canon, sont ensuite accélérés par un champ électrique intense. Une fois injectés dans le gaz, ces électrons ionisent un grand nombre des molécules successivement. Le processus s'arrête quand l'énergie des électrons devient inférieure au potentiel d'ionisation des molécules du gaz [JARRIGE, 2008].

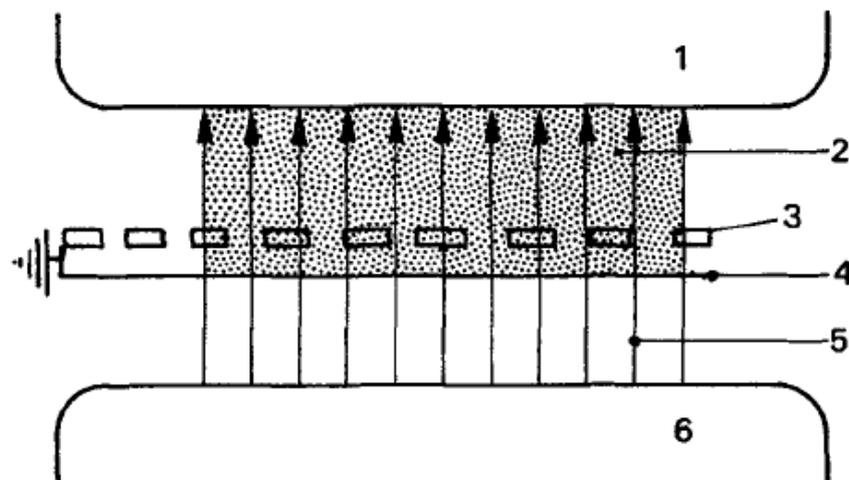


Figure 1- 3: Principe des décharges à faisceaux d'électrons- (1) Electrode de décharge ; (2) Plasma à caractériser ; (3) Electrode grille de protection ; (4) Fenêtre à électrons ; (5) Faisceau d'électrons ; (6) Electrode à très haute tension du canon à électrons

Cette technique permet d'améliorer l'homogénéité et la stabilité des décharges [FOURNIER, 1975]. Le principal problème posé réside dans le coût du matériel et de la maintenance (canon à électron, fenêtre en titane). En outre, le rendement énergétique du procédé reste faible vu qu'une partie importante de l'énergie est perdue au niveau de la fenêtre en raison des phénomènes de réflexion et d'absorption des électrons par le métal. Il semblerait donc intéressant d'améliorer le rendement de ces systèmes.

1.2.2 Décharges micro-onde

Les décharges micro-ondes sont produites à l'aide des systèmes à cavités résonnantes, à guide d'onde ou à effet de surface alimentés par un générateur de type magnétron [JARRIGE, 2008]. Ces systèmes comportent généralement un générateur micro-onde, un matériel micro-onde (guides d'onde, système d'accord), un système d'amorçage de la décharge et des injections de gaz (Figure 1-4). 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.

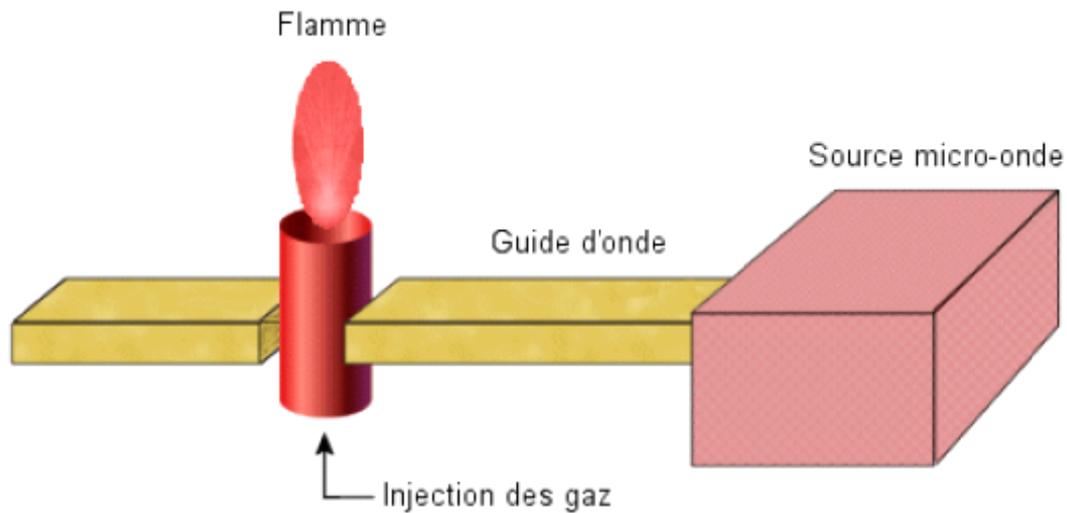


Figure 1- 4 : Schéma d'une torche plasma micro-onde [GUAY, 2001]

1.2.3 Décharges électriques à la pression atmosphérique

Dans les décharges électriques, un plasma est créé entre une électrode et une contre électrode métallique par application d'une différence de potentiel. Ainsi, contrairement aux procédés à faisceaux d'électrons, les électrons énergétiques ne sont pas injectés dans le milieu à partir d'une source externe, mais créés au sein du gaz par ionisation des molécules.

Parmi les décharges électriques à pression atmosphérique, on trouve la décharge couronne, la décharge à barrière diélectrique et la décharge lumineuse.

1.2.3.1 Décharge couronne

Les décharges de type couronne sont caractérisées par la dissymétrie géométrique des électrodes, c'est-à-dire qu'au moins l'une des deux électrodes présente des aspérités de surface comme par exemple des pointes (Figure 1-5) [LEROUX, 2007]. Lorsqu'on applique un haut potentiel électrique entre les deux électrodes, le gaz qui était initialement électriquement neutre devient plus ou moins conducteur en raison de la création d'électrons et d'ions [MAGNIER, 2007]. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique non uniforme dans l'espace inter-électrodes. Ce dernier peut être réparti en deux régions :

- La première région voisine des pointes où le champ électrique est intense, elle est le siège d'ionisation du gaz. Cette ionisation se caractérise par une zone « bleutée » au bout et tout autour de la pointe. La forme en couronne lumineuse autour de la pointe a donc donné le nom à la décharge [LABERGUE, 2005].

- Le reste de l'espace inter-électrode constitue la deuxième région où l'intensité du champ électrique devient beaucoup plus faible [BENDAOU, 2006]. Le plasma disparaît donc lentement dans cette zone avant d'atteindre la contre électrode, ce qui empêche le passage à l'arc électrique [GUAITELLA, 2006].

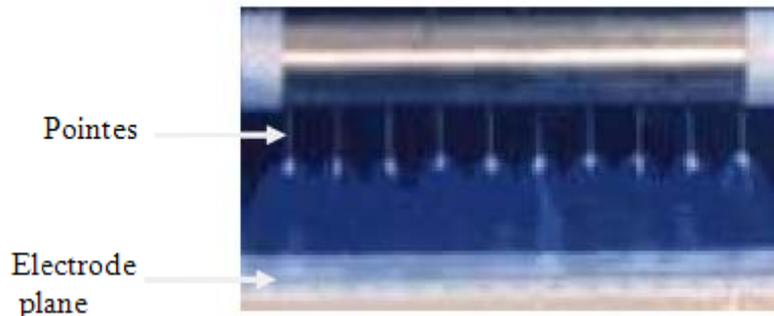


Figure 1- 5 : Décharge couronne lumineuse produite entre des pointes et une électrode plane reliée à la terre

Le plasma obtenu est donc fortement hétérogène et les électrons libres le constituant sont très chauds (température de l'ordre de 100 000 K). Ceci entraîne un traitement inhomogène et peut conduire à une forte dégradation du matériau [TENDERO, 2005]. Le temps de traitement est assez long. De plus, son efficacité dépend de la géométrie de l'électrode active (pointe, fil, plan,...). Le champ électrique ainsi créé diminue grandement en augmentant l'espace entre les deux électrodes. Pour pallier à ces problèmes, la décharge à barrière électrique a été développée.

1.2.3.2 Décharge à barrière diélectrique

Les décharges à barrière diélectrique (DBD), ou décharges silencieuses, sont caractérisées par la présence d'au moins une couche de matériau isolant en contact ou non avec les électrodes [JARRIGE, 2008]. Le matériau diélectrique recouvre soit l'électrode seule, soit l'électrode et la contre-électrode ou, si le matériau à traiter est isolant, c'est lui qui fait office du matériau diélectrique. Suivant le type d'applications envisagées, plusieurs formes et dispositions du couple électrode-diélectrique sont utilisées (Figure 1-6). A titre indicatif, les électrodes cylindriques sont plus adaptées au traitement des gaz, alors que les structures avec électrodes planes sont plutôt utilisées pour le traitement de surface [PANG, 2006]. L'avantage de ces types de configuration est de supprimer la possibilité de création d'arcs électriques entre les deux électrodes. Ceci permet l'obtention de décharges électriques plus uniformes, homogènes, stables et contrôlables que les décharges couronnes [MAGNIER, 2007]. De

même, avec ce type de décharges, il est rendu possible d'appliquer une densité de courant plus importante sur les matériaux à traiter. Il en résulte un plasma avec une densité d'électrons plus importante (de l'ordre de $10^{10} \text{ e}^-/\text{cm}^3$) mais une température de ces électrons plus faibles (20 000 à 50 000 K) le fait qui permet de réduire les phénomènes de dégradation de la surface à traiter [LEROUX, 2007].

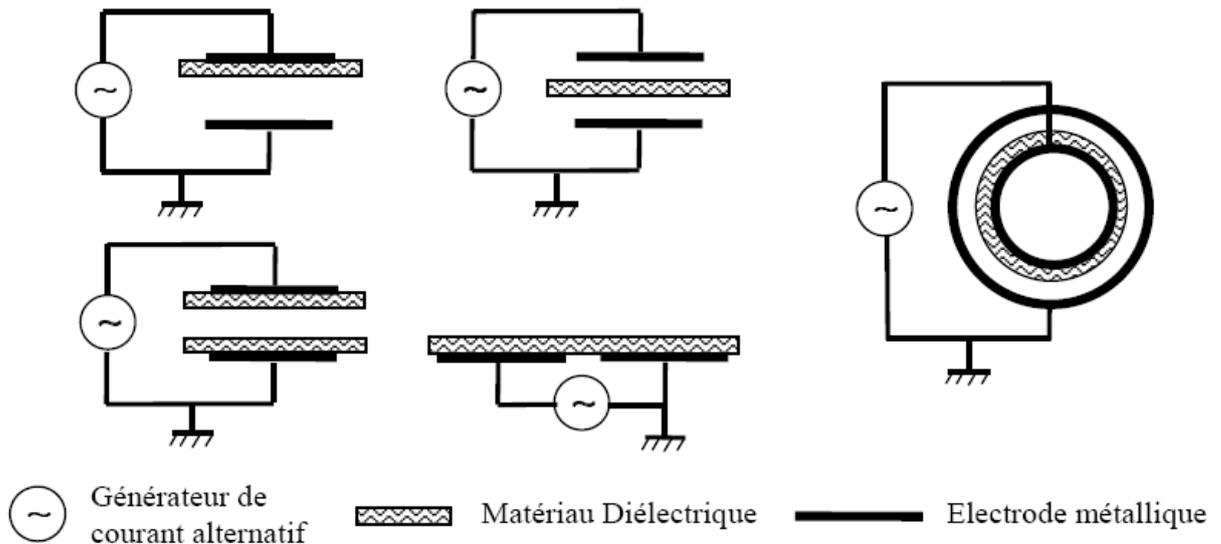


Figure 1- 6 : Différentes configurations de décharges à barrière diélectrique

Afin d'assurer la stabilité des décharges DBD, les distances inter-électrodes sont généralement limitées à quelques millimètres [TENDERO, 2005]. En effet, la tension s'établissant aux bornes du diélectrique induit une diminution substantielle de la tension aux bornes du gaz, et le champ réduit vu par le gaz est trop faible pour permettre la formation d'une décharge dans des gaps supérieurs au centimètre [JARRIGE, 2008].

1.2.3.3 Décharge lumineuse

La décharge lumineuse à pression atmosphérique (APGD : « Atmospheric Pressure Glow Discharge ») est caractérisée par une répartition spatiale de la lumière homogène radialement mais, localisée près d'une électrode lorsque la décharge est établie [SARRA-BOURNET, 2007] (Figure 1-7 (b)). De même, elle est caractérisée par une seule pulsation de courant par demi période, d'une durée de quelques microsecondes [SUBLET, 2007]. Au contraire dans le cas d'une décharge silencieuse, la formation du plasma résulte en la formation d'une multitude des micro-décharges de courte durée qui se développent simultanément et aléatoirement dans l'espace inter-électrodes [SARRA-BOURNET, 2007].

Ceci se traduit sur les traces de courant par une forêt de pulses très court (quelques nanosecondes) dont la distribution est non reproductible d'une décharge à la suivante (Figure 1-7 (a)) [SUBLET, 2007]. De plus, le courant de décharge est caractérisé par de nombreux pics apparaissant à chaque alternance de la tension [BAUVILLE, 2003].

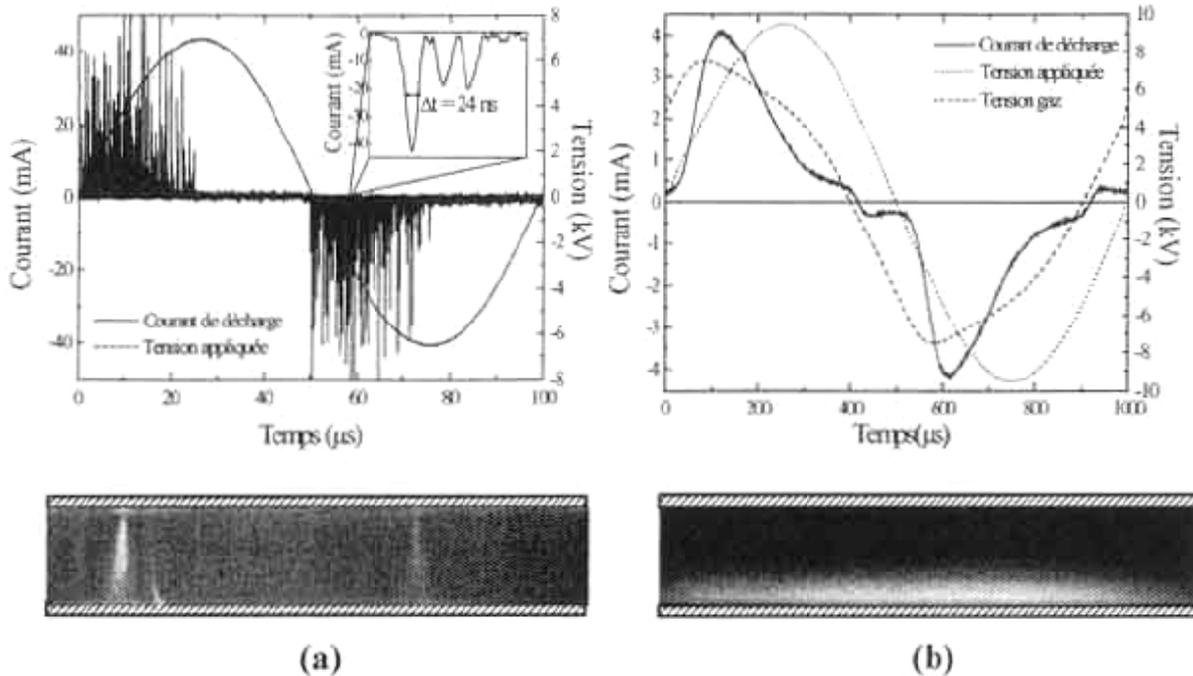


Figure 1- 7 : Caractéristiques électriques et photos de l'espace inter-électrodes (a) d'une décharge silencieuse et (b) d'une décharge lumineuse [JIMENEZ, 2002]

La décharge lumineuse offre donc l'avantage de produire un traitement homogène. Le plasma obtenu a une densité des électrons plus forte (10^{11} à 10^{12} e^-/cm^3) et une température de ces électrons plus faible (10 000 à 20 000 K) que les décharges DBD et couronne à pression atmosphérique. Aussi, l'espace entre les électrodes peut être beaucoup plus grand.

1.2.3.4 Autres types de décharges

D'autres types de décharges ont été développés pour différentes applications :

- Les décharges glissantes (*glidarc*), où un arc est entraîné par le flux de gaz entre deux électrodes divergentes.
- Les décharges de surface, où la propagation s'effectue le long de la paroi d'un diélectrique. Les électrodes sont placées sur la même face ou de part et d'autre de diélectrique.

- Les réacteurs à lit fixe (*packed-bed*), où des matériaux solides (billes, poudres) sont disposés entre les électrodes [JARRIGE, 2008].

Après avoir présenté les différentes techniques de génération de plasma à pression atmosphérique, nous intéressons dans le paragraphe suivant à décrire le principe de formation de décharges contrôlées par barrière diélectrique afin de mettre en évidence les paramètres importants pour l'obtention d'un plasma homogène.

1.3 Principe de la formation de décharges contrôlées par barrière diélectrique

Les décharges à barrière diélectrique sont en général excitées en appliquant une tension alternative de forme sinusoïdale, d'amplitude de quelques kilovolts avec une fréquence de répétition pouvant atteindre quelques kilohertz, entre deux électrodes dont l'une au moins est recouverte d'un diélectrique. Les matériaux utilisés couramment comme barrière diélectrique sont le verre, le quartz, l'alumine, des couches de polymères et certaines céramiques particulières.

Dans ce cas de systèmes, la formation du plasma résulte en la formation d'une multitude de micro-décharges qui sont distribuées aléatoirement dans le temps et dans l'espace. On peut voir à la Figure 1-8 une photographie de l'espace inter-électrodes présentant la présence de ces micro-décharges [SARRA-BOURNET, 2007].

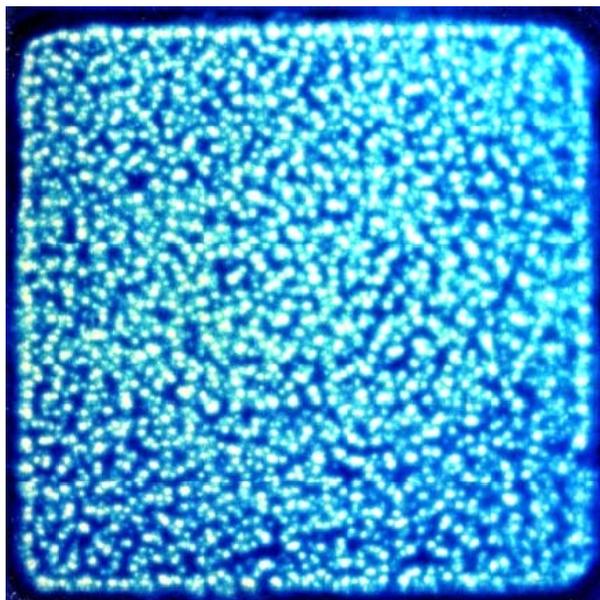


Figure 1- 8 : Filaments obtenus avec des électrodes carrées de 6cm de côté [GUAITELLA, 2006]

La Figure 1-9 décrit les étapes de la formation d'une micro-décharge.

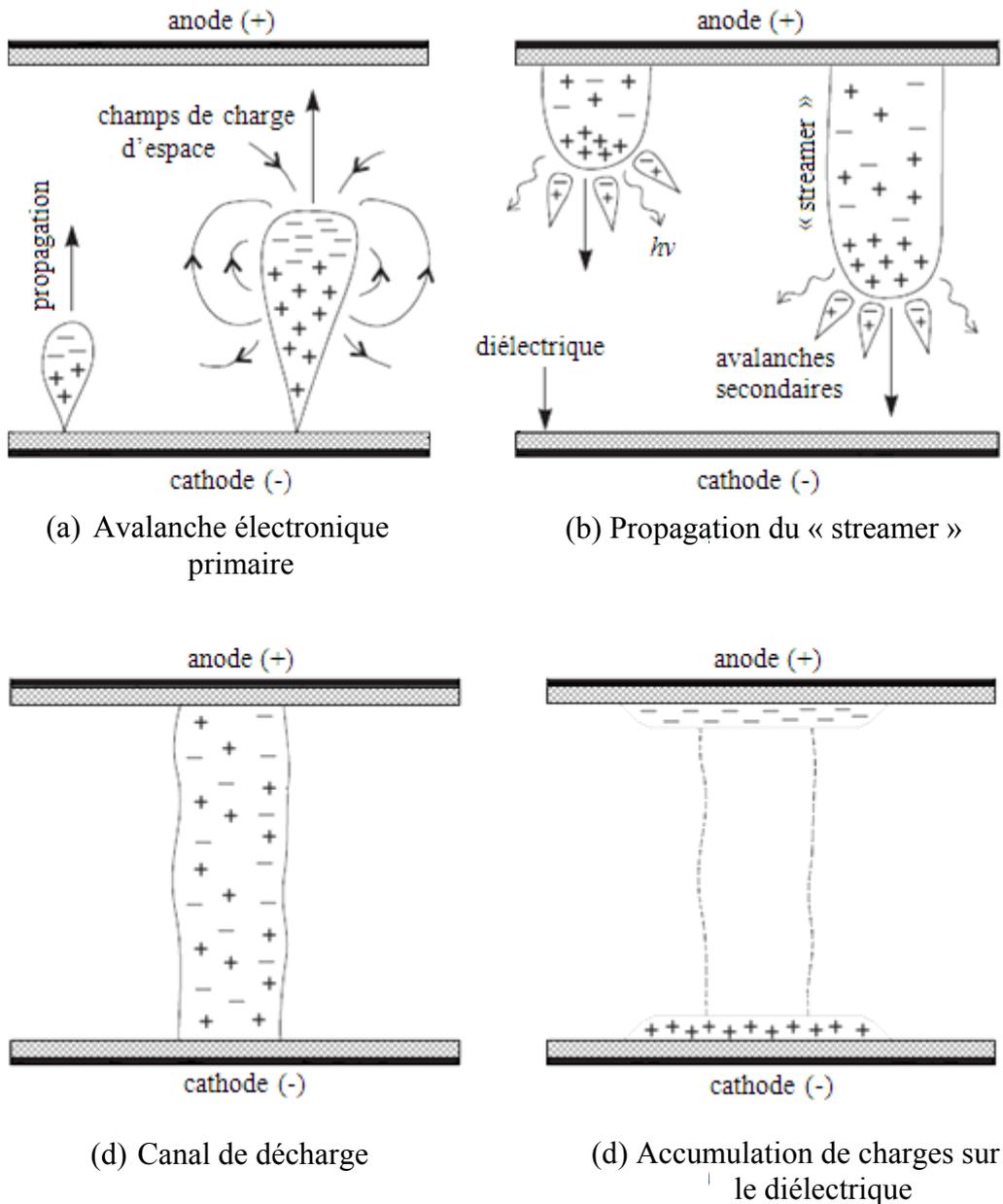


Figure 1- 9 : Schéma décrivant les étapes de la formation d'une micro-décharge filamentaire

1.3.1 Avalanche électronique

Le mécanisme de rupture d'un gaz dépend du produit *pression x distance* inter-électrodes ($P \times d$) [MERBAHI, 2004], [GUAITELLA, 2006]. Le claquage de Townsend est observé pour des valeurs de ce produit inférieures à quelques mbar.cm [PANG, 2006]. Au delà, le faible

parcours moyen des électrons (par rapport à la distance entre les électrodes) conduit à la localisation des phénomènes d'ionisation dans le gaz [ENACHE, 2007].

Dans une DBD, à la pression atmosphérique, l'espace d est de l'ordre de millimètre, le produit $P \times d$ est donc de l'ordre de 1 bar.mm. Il en résulte que le mécanisme de rupture de gaz le plus facilement et le plus fréquemment observé est de type filamentaire (ou « streamer »). Ce mécanisme se produit quand la tension appliquée aux électrodes est suffisamment élevée [DAILL, 2004]. En fait, les électrons libres naturellement présents dans le gaz sont accélérés par le champ électrique appliqué. Ils acquièrent ainsi assez d'énergie pour ioniser par collision des particules neutres du gaz, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons [HAIROUR, 2007]. Chaque électron nouvellement créé est à leur tour accéléré et peut provoquer d'autres ionisations. La quantité des électrons et ions positifs produits de cette façon s'appelle une avalanche électronique [BOUREK, 2005]. Ce phénomène croît très rapidement de la cathode vers l'anode. Les charges d'espaces forment une sorte de dipôle au sein même de l'avalanche : les électrons sont en tête de l'avalanche alors que les ions positifs restent en queue [SUBLET, 2007] (Figure 1-9 (a)). Ce dipôle génère son propre champ électrique, qui est d'autant plus intense que l'avalanche se multiplie.

1.3.2 Transition avalanche- « streamer » et propagation

L'arrivée de multiples avalanches électroniques à proximité de l'anode conduit à l'accumulation d'ions et il ne reste que les charges d'espaces positives de la queue de l'avalanche dans l'espace inter-électrodes. Lorsque le champ dû à ce nuage positif devient du même ordre de grandeur que le champ appliqué, la zone de séparation de charge va pouvoir ce propager en sens inverse des électrons, créant un filament appelé « streamer » [GUAITELLA, 2006]. Le temps nécessaire (τ_c) pour que cette transition avalanche- streamer se fasse dépend de la pression, de la nature du gaz plasmagène ainsi que de la tension appliquée (Equation 1-5).

$$\tau_c = \frac{d}{u_e} = \frac{\alpha d}{v_i} = \frac{d}{\mu E} \quad (1-5)$$

où d est la distance inter-électrode, α le coefficient d'ionisation, u_e la vitesse de dérive électronique, v_i la vitesse d'ionisation et μ la mobilité électronique au champ local (E).

La propagation du « streamer » est causée par des phénomènes de photo-ionisation et d'avalanches secondaires qui se créent au voisinage de la tête de ce dernier. En aval du front d'ionisation, entre l'anode et la tête du « streamer », les électrons d'avalanches secondaires

dérivent et se mélangent aux ions issus de l'avalanche primaire pour former un plasma quasi-neutre. De même, les ions secondaires, se déplaçant bien plus lentement que les électrons, sont à leur tour intégrés à la tête du « streamer ». Ils forment la nouvelle tête, chargée positivement, du « streamer » qui s'étend de cette manière [SUBLET, 2007] (Figure 1-9 (b)).

1.3.3 Canal de décharge

Lorsque le « streamer » finit de se propager, les deux électrodes se retrouvent en jonction par l'intermédiaire d'un canal ionisé de décharge (Figure 1-9 (c)). Le courant au travers du canal entraîne une accumulation de charges sur le diélectrique et par la suite, une diminution rapide de la différence du potentiel de l'espace gazeux (Figure 1-9 (d)). Par ailleurs, les mécanismes de destruction des électrons (recombinaison et attachement) deviennent plus importants que les mécanismes de production (ionisation) [MERBAHI, 2004]. Le champ dans le gaz devient alors nul et le filament s'éteint [SUBLET, 2007]. Le temps de vie très court des micro-décharges (10^{-9} s) permet ainsi de limiter le chauffage du gaz à quelques degrés seulement ce qui renforce l'intérêt des DBD pour les traitements de surface [GUAITELLA, 2006].

La présence du diélectrique permet non seulement d'inhiber le passage de l'arc, mais aussi de répartir spatialement les micro-décharges [ALLEGRAUD, 2008]. En effet, une micro-décharge s'effectuant en un point du diélectrique laisse à la surface du diélectrique des charges résiduelles provoquant localement un champ électrique diminué voir opposé qui empêchera l'arrivée de nouvelles micro-décharges. Celles-ci s'accrochent donc sur un autre point de la surface [LERIDE, 2006]. Au final, le plasma va couvrir toute la surface disponible. Le Tableau 1-2 récapitule les principales caractéristiques physiques d'une micro-décharge dans une DBD.

Durée (ns)	1 - 10
Rayon d'un filament (mm)	0,1
Densité du courant ($A \cdot cm^{-2}$)	100 - 1000
Densité électronique (cm^{-3})	10^{14} - 10^{15}
Energie électronique moyenne (eV)	1 - 10

Tableau 1- 2 : Caractéristiques physiques d'une micro-décharge [LEROUX, 2007]

1.4 Le plasma atmosphérique dans l'industrie textile

1.4.1 Généralités

Le traitement de surface par plasma connaît depuis quelques années un intérêt croissant dans le secteur textile. En effet, cette technique constitue une alternative tout à fait intéressante pour la modification des propriétés de surface des matériaux textiles. Elle présente des nombreux avantages cités comme suit [HERBERT, 2007]:

- ✓ Modification de la surface sans affecter les propriétés intrinsèques du matériau traité. La profondeur typique de la modification est de quelques dizaines de nanomètres (nm).
- ✓ La réactivité des espèces présentes dans le plasma permet de modifier tous les matériaux, quelle que soit leur structure.
- ✓ Le choix de gaz permet de déterminer les types de modifications,
- ✓ Procédé écologique : il ne recourt à aucune solution chimique,
- ✓ Simplicité de mise en œuvre,
- ✓ La modification peut être uniforme sur toute la surface traitée...

Dans un premier temps, toutes les technologies développées se basent sur les propriétés des plasmas maintenus à pression réduite. Ce type de plasma a pour avantage l'utilisation d'un gaz plasmagène chimiquement contrôlé mais il présente l'inconvénient des traitements discontinus. En effet, les matériaux à traiter sont placés dans une enceinte confinée qu'il faudra mettre sous vide et ensuite remplir à la pression désirée avec le gaz plasmagène à qui l'énergie est transférée par le biais d'une décharge électrique contrôlée. En dépit de bons résultats de cette méthode, elle n'a pas réussi à s'imposer dans le secteur textile en raison du coût du matériel élevé (pompe à vide...) et de son incompatibilité avec une production industrielle à la continue.

Récemment, les plasmas à pression atmosphériques sont apparus pour pallier à l'ensemble de ces inconvénients. En effet, ces plasmas ne nécessitent pas de mise sous vide, fonctionnent en continu et peuvent être intégrés dans une ligne de production puisque le système est complètement ouvert. Ils permettent ainsi de traiter les matériaux plus rapidement, d'accroître considérablement la productivité et de réduire le niveau de maintenance. Cependant, à la pression atmosphérique, la distance entre les électrodes est plus réduite. Ceci limite leur utilisation à des substrats à une ou deux dimensions comme les tissus, les fibres, les films ou

les plastiques. De même, l'utilisation de gaz plasmagène est beaucoup moins contrôlée chimiquement du fait de caractère ouvert de l'enceinte de génération de plasma. De ce fait, tous les gaz ne peuvent pas être utilisés dans ce type de machines pour des raisons environnementales. Pour remédier à ce problème, des techniques, utilisant une enceinte hermétique permettant le contrôle du gaz plasmagène et un générateur permettant la création du plasma à pression atmosphérique, ont été développées. Ces systèmes permettent le contrôle rigoureux des traitements réalisés, mais ils sont encore une fois de type discontinu.

1.4.2 Systèmes plasmas atmosphériques utilisés dans l'industrie textile

Les machines plasmas atmosphériques communément utilisées pour des applications textiles sont les systèmes de type hybride Corona/DBD, DBD et APGD.

1.4.2.1 Système hybride Corona/DBD

Le système hybride Corona/DBD utilise une électrode et une contre électrode toutes les deux recouvertes d'un matériau diélectrique. La contre électrode est généralement de forme cylindrique (Figure 1-10). Le matériau diélectrique le plus utilisé est la céramique. La distance inter-électrode est relativement faible car elle est le plus souvent comprise entre 1,5 et 6 mm. Dans ce cas, le matériau à traiter est plaqué contre la contre- électrode et uniquement la surface en contact avec le plasma sera traitée. Divers types de gaz peuvent être utilisés mais la plupart de temps c'est l'air ambiant qui est utilisé. La tension électrique varie entre 1 et 10 kV. La fréquence est de 10 à 50 kHz [HERBERT, 2007].

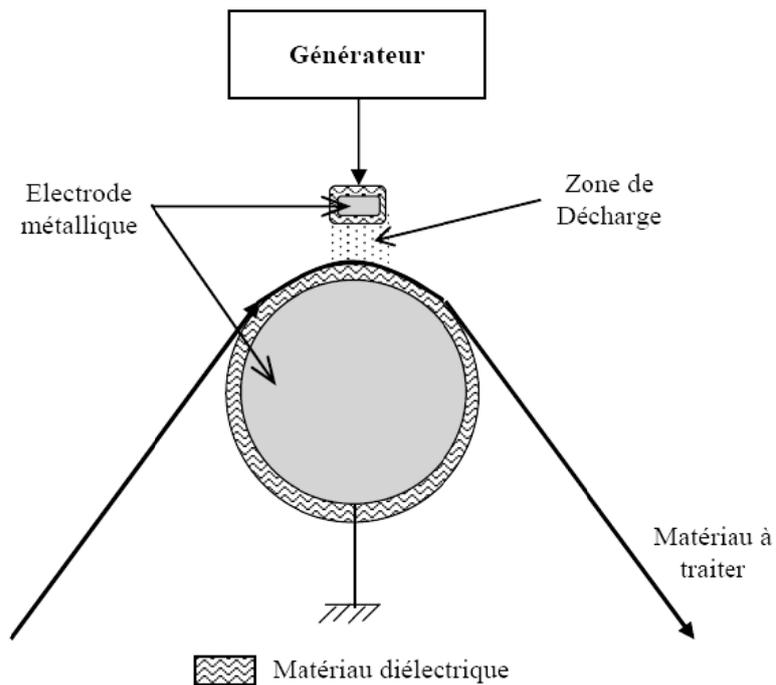


Figure 1- 10 : Système hybride Corona/DBD [LEROUX, 2007]

1.4.2.2 Système DBD

Le plasma est généré entre deux larges électrodes parallèles l'une par rapport à l'autre (Figure 1-11). Dans ce cas, le matériau est traité sur les deux faces puisque il passe directement au milieu du plasma. L'espace inter-électrode est plus élevé (≈ 6 mm) que pour les systèmes hybrides Corona/DBD. Les gaz utilisés pour ce type de décharges sont l'hélium, l'argon et l'azote. De même, des mélanges de ces gaz peuvent être utilisés [HERBERT, 2007].

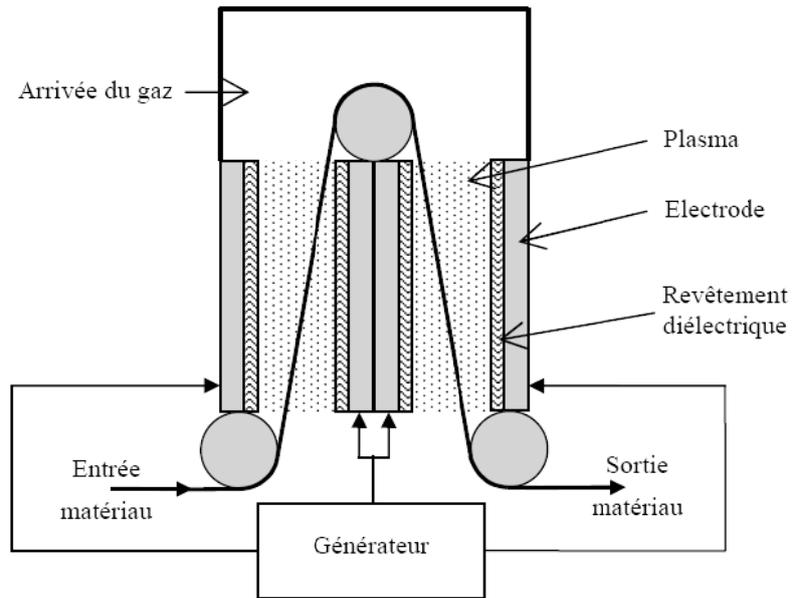


Figure 1- 11 : Système DBD [LEROUX, 2007]

1.4.2.3 Systèmes APGD

Le plasma est généré entre deux électrodes métalliques (Figure 1-12). La contre électrode a besoin d'être refroidie par une circulation d'eau. Le matériau à traiter ne passe pas directement entre les deux électrodes. En effet, le plasma créé est pulsé vers la matière. Il s'agit donc d'un traitement plasma post-décharge. Le gaz plasmagène utilisé est l'hélium car il a la particularité d'être très stable sous sa forme plasmatique.

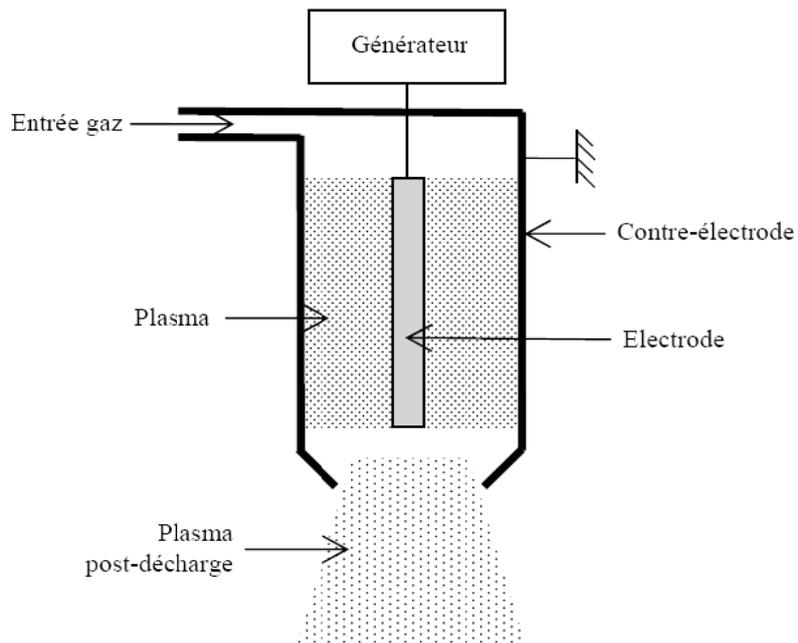


Figure 1- 12 : Système APGD [LEROUX, 2007]

1.5 Interactions plasma- surface et modification de surface de fibres et polymères

Depuis quelques dizaines d'années, les traitements plasmas de polymères ont acquis une très grande popularité. En effet, ces traitements permettent d'apporter toute une série de nouvelles propriétés aux polymères qui sont généralement affectés par leur caractère hydrophobe [VANDENCASTEELE, 2008]. Les technologies par plasma semblent donc de bons challengers puisqu'ils permettent de modifier chimiquement et/ou physiquement la surface des matériaux polymériques pour augmenter leur mouillabilité et leur adhésion vis-à-vis de métaux ou de polymères, sans altérer leurs propriétés intrinsèques.

1.5.1 Interactions plasma-surface

Lors du passage d'un substrat dans d'une décharge plasma, la surface des polymères est bombardée par les espèces énergétiques (ions, électrons, radicaux libres et radiations UV) présentes dans le milieu. Chacune de ces espèces va modifier d'une manière différente la surface des polymères (Tableau 1-3).

Composant du plasma	Energie cinétique	Effet sur les polymères	Profondeur d'interaction
Ions, atomes neutres	100-500 eV	Collisions élastiques Réactions chimiques	2-5 nm
	10 eV	Réactions chimiques	Monocouche
Electrons	5-10 eV	Collisions inélastiques Coupure de chaîne Ionisation de surface	1 nm
Métastables	0,05 eV	Formation de groupes fonctionnels Formation de groupements volatils Diffusion et réactions chimiques	Monocouche En profondeur
Photons	> 5 eV	Réactions photochimiques	10-50 nm
	< 5 eV (UV)	Réactions photochimiques	Quelques μm

Tableau 1- 3 : Modifications apportées par les constituants de plasma sur la surface des polymères [LEROUX, 2007]

Les ions, les électrons et les atomes neutres sont responsables des coupures de chaînes macromoléculaires. Au niveau de la coupure d'une liaison, il va y avoir une réaction chimique avec les espèces actives présentes dans le plasma engendrant la création d'un nouveau groupement fonctionnel, ou la formation d'une double liaison ou encore la possibilité d'une interaction inter-chaînes macromoléculaires. En outre, les radiations du plasma comme les UV vont essentiellement engendrer des réactions photochimiques comme par exemple la formation des radicaux libres et de réticulations inter-macromoléculaires. La Figure 1-13 représente schématiquement les différentes réactions pouvant avoir lieu à partir de la création des radicaux à la surface des polymères.

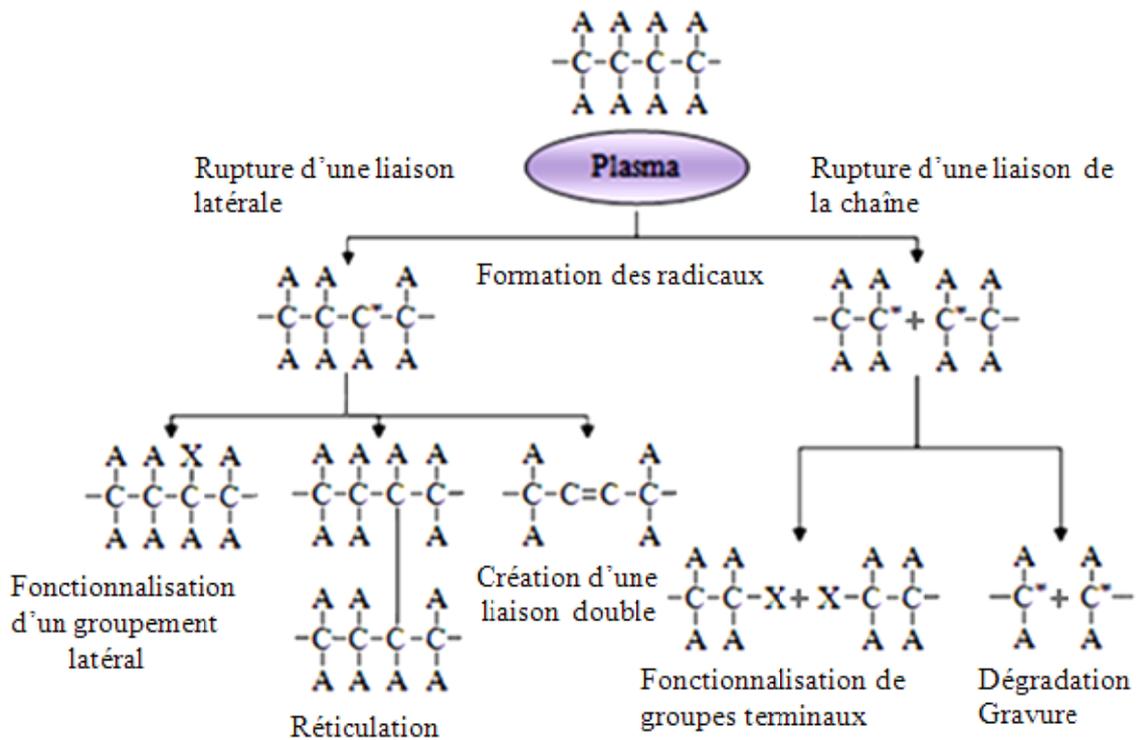


Figure 1- 13 : Schéma des réactions du contact d'un plasma à la surface d'un polymère (A : groupements latéraux initiaux du polymère et X : nouveau groupement créé) [SARRA-BOURNET, 2007]

Il en résulte plusieurs types de réactions de surface telles que l'implantation, le transfert d'énergie et la création des fonctions chimiques. La nature et la proportion des fonctions créées dépendent de la nature du gaz ainsi que de type de polymère traité [VALT, 2008].

1.5.2 Modification de surface de fibres et polymères par plasma

Contrairement aux procédés liquides qui affectent les fibres en profondeur, les plasmas provoquent uniquement une réaction de surface et les fonctionnalités qu'ils apportent sont limitées à une couche superficielle de quelques nanomètres. Ces fonctionnalités, applicables aussi bien à des fibres naturelles ou polymérisées qu'à des textiles non tissés, peuvent être classées en 4 principales catégories : le nettoyage de surface, la gravure, la polymérisation plasma et l'activation de surface.

1.5.2.1 Le nettoyage de surface

Le nettoyage de surface consiste à éliminer de la surface de l'échantillon les contaminants de nature diverse tels que l'huile, les poussières, les agents chimiques ou biologiques. Ce type de traitement existe à l'échelle industrielle depuis de nombreuses années mais il utilise des solvants. En raison des coûts importants de l'emploi des systèmes aqueux et de l'effet néfaste des solvants sur l'environnement, d'autres solutions alternatives ont été développées pour pallier à ces inconvénients. Parmi ces solutions, les plasmas semblent promoteurs vu qu'ils permettent d'assurer un nettoyage ultrafin des surfaces les plus diverses. Le mode d'action du plasma consiste à réagir sur les impuretés en surface et les transformer en composés volatils ce qui permet d'obtenir une adhérence optimale des peintures, encres ou colles. Le nettoyage est généralement réalisé sous plasma oxydant. En outre, ce procédé présente l'avantage d'être capable d'enlever même des substances chimiquement stable et d'une grande adhésivité ainsi que de s'effectuer sans problèmes sur pratiquement toutes les géométries des matériaux à traiter.

1.5.2.2 La gravure de surface

La gravure repose sur le même principe que le nettoyage. La différence qui se présente cette fois-ci est que, au lieu d'agir sur les contaminants en surface, les espèces réactives du plasma interagissent avec les atomes du substrat pour former des nouvelles espèces volatiles qui seront évacuées de la surface par pompage. La vitesse de gravure dépend de divers paramètres tels que la composition du plasma, la nature du substrat et les conditions opératoires (puissance, débit de gaz, position de l'échantillon, etc.). L'hélium est souvent utilisé comme gaz plasmagène pour stabiliser la décharge [TENDERO, 2005].

1.5.2.3 La polymérisation plasma

La polymérisation plasma permet de déposer des couches de polymères sur un très grand nombre de substrats différents [VANDENCASTEELE, 2008]. Dans ce cas, le monomère organique utilisé est activé et polymérisé au sein du plasma ce qui induit la formation des radicaux libres. Ces radicaux se recombinent de façon aléatoire dans le plasma et se condensent sur la surface du substrat pour former une mince couche amorphe. Selon la nature du gaz plasmagène, la couche obtenue peut apporter des fonctionnalités particulières (hydrophilie, barrière chimique, dureté, résistance à la corrosion, esthétique, etc.) tout en préservant les propriétés intrinsèques du substrat. Les gaz pouvant polymériser par plasma sont entre autre CH_4 , C_2H_6 , C_2F_4 , etc.

1.5.2.4 L'activation de surface

L'activation de surface consiste à greffer des nouvelles fonctions chimiques à la surface de matériau dans le but de lui conférer des propriétés spécifiques en améliorant sa mouillabilité (énergie de surface) et ses caractéristiques d'adhésion voire d'anti-adhésion. Ce type de traitement résulte de l'interaction plasma- polymère en atmosphère de gaz inorganique. En fait, le bombardement de la surface par les espèces énergétiques créées au sein du plasma conduit à la rupture des liaisons covalentes (coupure de chaînes macromoléculaires) et la formation des radicaux libres. Ces derniers réagissent avec les espèces actives du plasma et provoquent la modification des caractéristiques chimiques de surface. C'est ce type de traitement que nous allons étudier lors de ces travaux de thèse. Les effets obtenus par un tel procédé dépendent principalement de la chimie du gaz plasmagène. A titre d'exemple, pour se focaliser sur notre étude, un gaz plasmagène comme l'air permet de modifier des nombreux polymères en ajoutant des groupements oxydés de type $-\text{C}-\text{O}-$, $-(\text{C}=\text{O})-$, $-\text{O}-(\text{C}=\text{O})-$ et $-\text{C}-\text{O}-\text{O}-$ voire amines à leur surface [LEROUX, 2007]. En outre, l'emploi d'un plasma d'oxygène conduit au greffage de fonctions chimiques polaires et hydrophiles qui favorisent l'augmentation de l'énergie de surface. De la même façon, les plasmas azotés donnent lieu à la formation des groupements hydrophiles, en particulier de groupement amine ($-\text{NH}$, $-\text{NH}_2$). A l'inverse des plasmas oxydés ou azotés, les plasmas fluorés (type CF_4 , CHF_3 ,...) permettent de convertir les surfaces hydrophiles en surfaces hydrophobes.

Par ailleurs, les modifications de surfaces apportées par plasma sont influencées par plusieurs paramètres tels que la nature de gaz plasmagène, la puissance électrique et le temps de traitement. Par exemple, un plasma d'oxygène aura plus d'impact sur la matière qu'un plasma d'azote [CERIA, 2008]. De même, une augmentation de la puissance électrique ou bien du temps de traitement plasma entraîne une modification de surface plus importante [GEYTER, 2006].

La nature chimique de polymère et ses caractéristiques physiques peuvent aussi avoir une influence sur les modifications apportées par les traitements plasma. En effet, plus ses liaisons chimiques intramoléculaires seront fortes, plus il sera difficile pour le plasma de le modifier chimiquement. Ceci s'explique par le fait que les régions cristallines sont plus résistantes aux coupures de chaînes macromoléculaires que les zones amorphes. Ainsi, les coupures de chaînes se font principalement au niveau des liaisons les plus faibles. A titre d'exemple, pour le poly(éthylène téréphtalate) (PET), les modifications auront lieu au niveau des fonctions esters $(-\text{C}=\text{O})\text{OC}-$ beaucoup plus fragiles. Selon Leroux [LEROUX, 2007], un mécanisme de modification du PET par un plasma sous air a été proposé dans la littérature. Ce mécanisme se repose sur deux étapes : la première consiste à la coupure des liaisons les plus faibles (fonctions esters) (Figure 1-14 (a)) et la deuxième consiste à l'oxydation des radicaux créés en bout de chaîne. Ceci entraîne l'obtention de groupes carbonyles, carboxyles et hydroxyles (Figure 1-14 (b)).

Deux types de coupure de chaînes macromoléculaires :

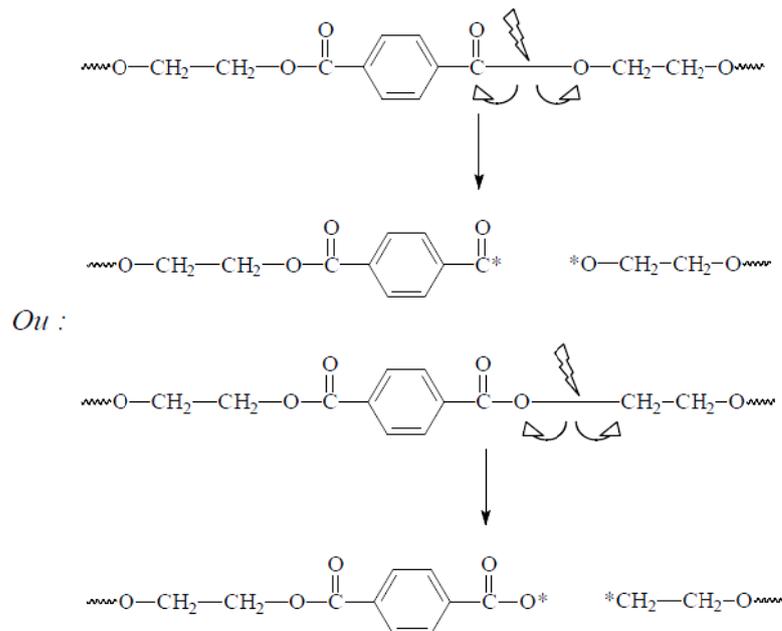


Figure 1- 14 (a) : Représentation des coupures de chaîne d'une macromolécule de PET (« L'éclair » représente le lieu de la décharge) [LEROUX, 2007]

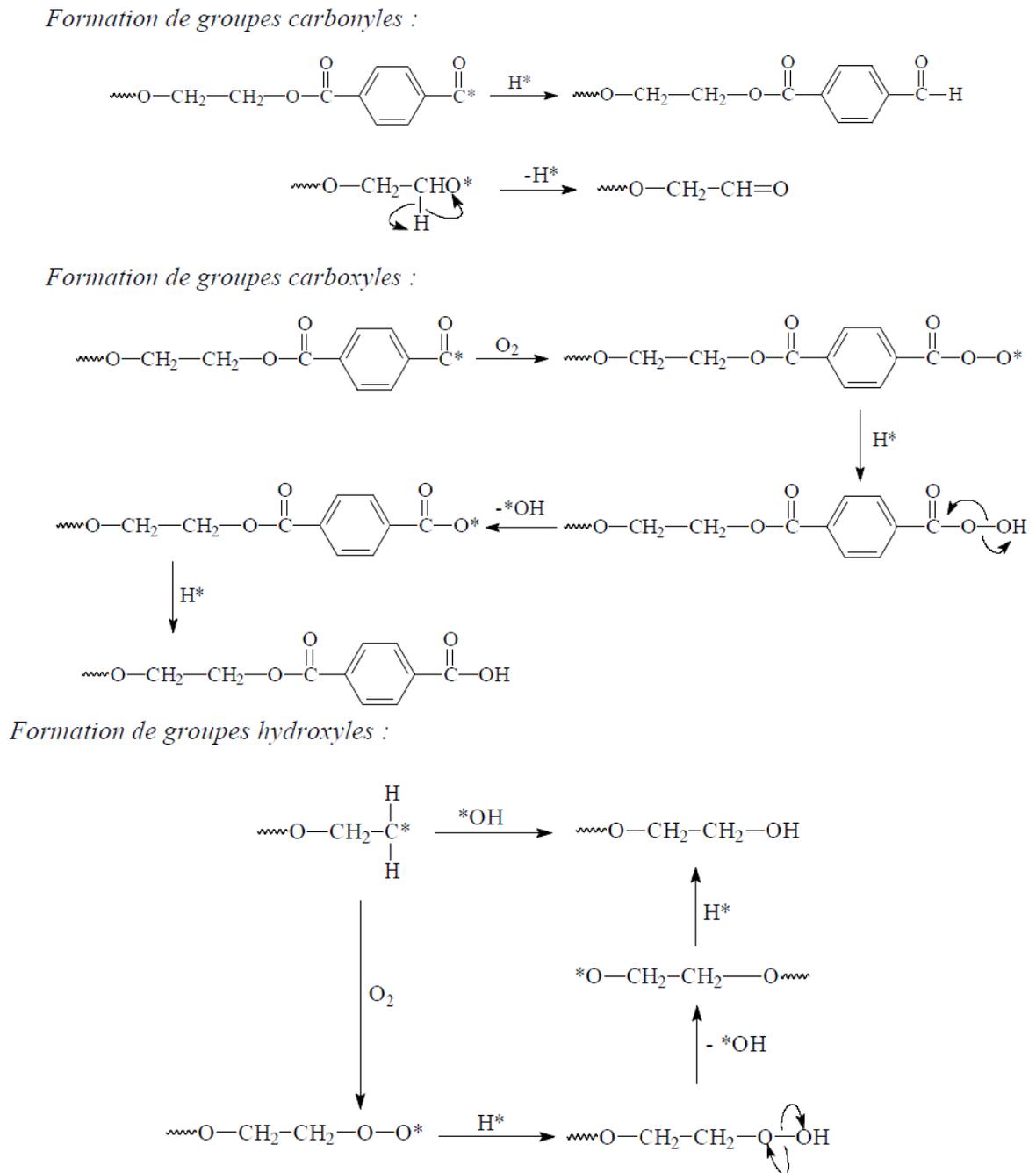


Figure 1-14 (b) : Représentation des réactions d'oxydation du PET [LEROUX, 2007]

Ainsi, les traitements plasma offrent la possibilité d'incorporer à la surface de polymères des nouvelles fonctions qui ont l'effet de modifier les propriétés de surface sans pour autant modifier les propriétés intrinsèques. Cependant, il est important de suivre le devenir ces fonctions au cours de temps car elles peuvent subir un effet de vieillissement.

En général, le phénomène de vieillissement de la surface traitée par plasma provient des modifications dynamiques liées à l'évolution dans le temps des fonctions chimiques

greffées. Une technique permettant de suivre cette évolution consiste à déterminer l'énergie de surface à partir de la méthode de l'angle de contact. Les résultats de vieillissement dépendent de l'état de la surface traitée ainsi que des conditions de stockage. L'étude de ce phénomène va donc permettre d'évaluer la stabilité des modifications apportées par plasma.

Dans cette partie nous avons présenté les mécanismes d'interactions plasma-surface ainsi que les modifications de surfaces qui peuvent être engendrées par le traitement plasma. Dans la partie suivante, nous allons dresser un état de l'art sur le traitement des matériaux textiles par plasma afin de donner une idée des traitements pouvant être effectués et déterminer l'influence des paramètres de réglage du procédé plasma sur les résultats du traitement.

1.6 Applications des traitements par plasma aux matériaux textiles

Dans cette partie, nous allons détailler uniquement les recherches ayant été effectuées dans le domaine du textile sans détailler l'application du plasma sur des films ou bien des métaux. L'avantage principal du traitement plasma est que, suivant la composition de gaz, les effets engendrés sur les matériaux textiles peuvent être multiples comme par exemple le greffage des fonctions chimiques, la modification topographique à l'échelle nanométrique de la surface, l'amélioration de l'adhésion et le nettoyage de surfaces.

1.6.1 Modification de l'énergie de surface

Le plasma est une source riche en particules énergétiques et chimiquement actives (électrons, ions, photons, radicaux). Lorsque ces espèces interagissent avec des matériaux textiles, elles engendrent à la surface de ceux-ci la formation de groupements chimiques fonctionnels dépendant 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.

1.6.1.1 Obtention des surfaces hydrophiles

Les traitements par plasma permettent d'augmenter l'énergie de surface des matériaux textiles et de les rendre absorbants. Les gaz plasmagènes qui peuvent être utilisés sont de type air, O₂, CO₂, N₂, NH₃, Ar, etc. Ces gaz permettent de créer en surface des sites hydrophiles.

1.6.1.1.1 Fibres naturelles

Karahan et al. [KARAHAN, 2008] ont réalisé des traitements par plasma atmosphérique de type décharges à barrière diélectrique sous air et argon sur un tissu de coton. Ils ont remarqué une diminution significative de l'angle de contact envers l'eau qui est passé de $107,83^\circ$ à 0° après un traitement de 60 secondes à une puissance de 130 W (Figure 1-15). De même, ils ont remarqué une augmentation du pouvoir capillaire. Cette augmentation est plus importante si le gaz plasmagène utilisé est de l'argon comparé au traitement réalisé sous air. Ils ont relié ce résultat à la modification topographique de la surface. En effet, ils ont observé que l'érosion de la surface est plus importante dans le cas de l'argon. Ils ont émis l'hypothèse que les cratères formés en surface peuvent entraîner une diminution de la pression capillaire et ainsi une amélioration de la capillarité.

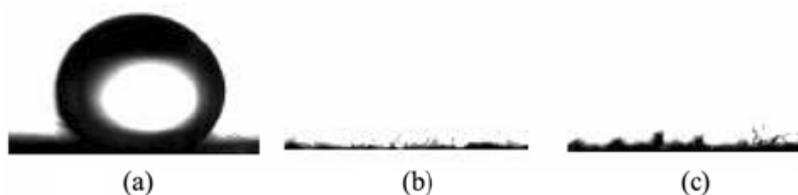


Figure 1- 15 : Photographie des angles de contacts obtenus à la surface d'un tissu de coton avant et après traitement plasma : (a) surface non traitée ; (b) surface traitée sous air (130 W, 60 secondes) ; et (c) surface traitée sous argon (130 W, 60 secondes) [KARAHAN, 2008]

Les mêmes types de résultats ont été observés par Sun et al. [SUN, 2004] en traitant des tissus de coton et de laine par un plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression réduite sous dioxygène pendant 3 minutes. Il en résulte une amélioration de l'épuisement des bains de teinture de coton (Figure 1-16) et de laine (Figure 1-17).

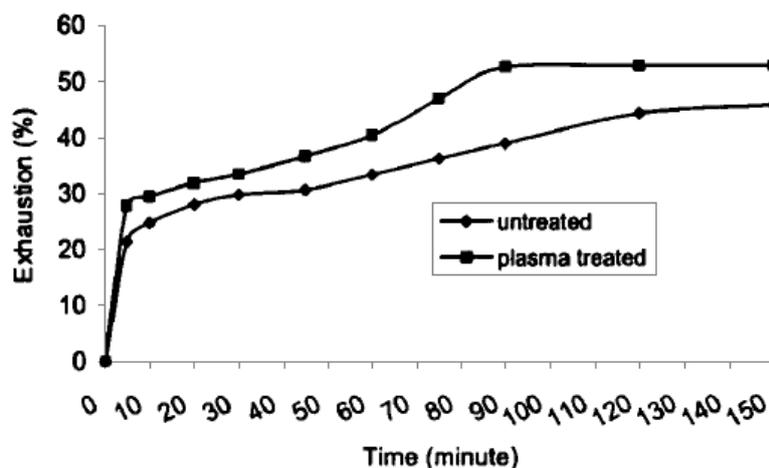


Figure 1- 16 : Epuisement d'un bain de teinture (colorant Remazol Brilliant Red GG) en fonction du temps pour un tissu de coton à une température de 40°C [SUN, 2004]

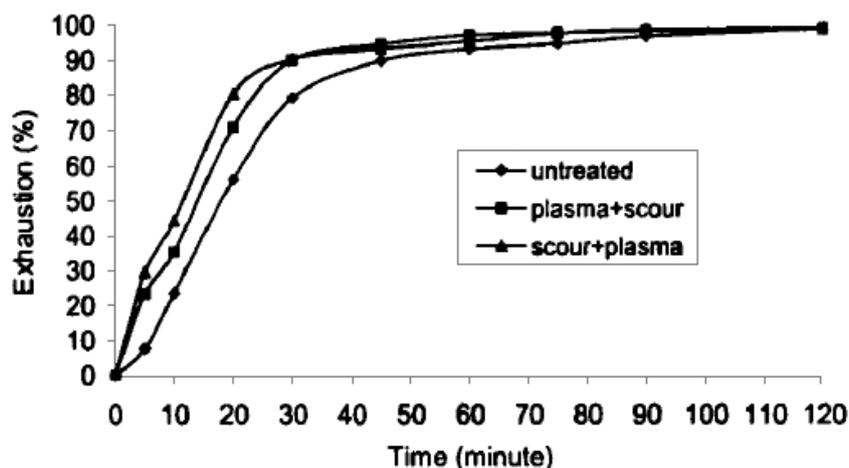


Figure 1- 17 : Epuisement d'un bain de teinture (colorant Neolan Red P) en fonction du temps pour un tissu de laine à une température de 98 °C [SUN, 2004]

Kan et al. [KAN, 1997] ont montré également que des traitements par plasma à pression réduite sous dioxygène, azote ou bien un mélange azote/hydrogène pendant 5 minutes permettent d'augmenter l'hydrophilie d'un tissu de laine. En fait, ils ont observé que le temps d'absorption d'une goutte d'eau déposée à la surface de tissu est passé de 900 secondes à moins d'une seconde après traitement. Il en résulte ainsi une augmentation du rendement coloristique des teintures.

Ceria et al. [CERIA, 2008] ont démontré que le traitement d'un tissu de laine par un plasma à pression réduite sous dioxygène (O_2) est plus efficace que celui réalisé à pression atmosphérique sous azote. De même, ils ont remarqué, après traitement, que l'épuisement de bain de teinture obtenu à une température de 85°C est comparable à celui obtenu par le procédé classique de teinture à 98°C. Ils ont conclu que les traitements plasma permettent d'améliorer le procédé classique de teinture en diminuant la température de bain et par conséquent la consommation d'énergie.

Cai et al. [CAI, 2006a] ont étudié l'impact des traitements par plasma atmosphérique sous des mélanges air/hélium et dioxygène/hélium pendant 3 minutes sur un tricot de laine. Ils ont remarqué une diminution de l'angle de contact envers l'eau qui est passé de 132,4° à 0°. Ils ont constaté aussi une augmentation du taux d'oxygène en surface de 20,3 % dans le cas de traitement sous air/ hélium et de 53,5 % dans le cas de traitement sous dioxygène/hélium. De même, le rapport oxygène/carbone est augmenté de 25,1 % dans le premier cas et de 79,5 % dans le second cas. Xu et al. [XU, 2009] ont observé les mêmes types de résultats en traitant

des tricots de laine par plasma radiofréquence (13,56 MHz) sous hélium ou bien un mélange dioxygène/hélium. En outre, ils ont remarqué que lorsque l'humidité relative des tricots augmente, la modification chimique de la surface devient plus importante.

Wong et al. [WONG, 1999] ont traité un tissu de lin par plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression réduite sous dioxygène et argon. Après un traitement de 60 minutes à une puissance de 200 W, ils ont remarqué une augmentation du taux d'oxygène en surface atteignant 52,62 % dans le cas de plasma de dioxygène et 55,97 % dans le cas de plasma d'argon.

1.6.1.1.2 Fibres artificielles

Zemljic et al. [ZEM LJIC, 2009] ont traité un substrat de viscose par un plasma radiofréquence à pression réduite (27,12 MHz) sous dioxygène pendant 30 secondes. Ils ont constaté une diminution de l'angle de contact de 66° à 15°. De même, ils ont remarqué une augmentation de la teneur en oxygène à la surface de 13 %. Ils ont attribué ces résultats à la création de groupements polaires sur la surface des fibres de viscose. En outre, un court vieillissement leur a montré que l'angle de contact (Figure 1-18) et le teneur d'oxygène en surface se stabilisent au cours du temps. Par contre, ils ont remarqué une diminution importante du pouvoir capillaire qui est passé de 137 % à 92 % après 96 heures de vieillissement.

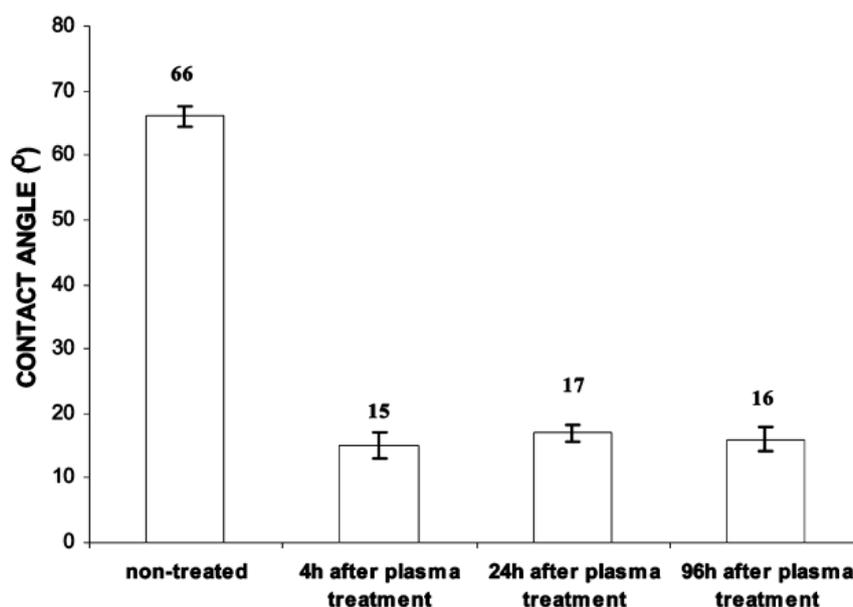


Figure 1- 18 : Evolution des angles de contact avec l'eau en fonction du temps de vieillissement pour un substrat de viscose [ZEM LJIC, 2009]

Vrabic et al. [VRABIC, 2007] ont étudié l'impact d'un traitement plasma radiofréquence (27 MHz) à pression réduite sous argon sur les propriétés d'absorption des fibres de viscose. Ils ont remarqué que plus le temps de traitement est important, plus le pouvoir absorbant des fibres de viscose sera grand (Figure 1-19). En outre, ils ont constaté que des longs traitements peuvent endommager la structure des fibres et provoquer une diminution du degré de polymérisation. De ce fait, ils ont conclu que même un temps de traitement de 5 minutes est suffisant pour obtenir une bonne hydrophilie des fibres de viscose.

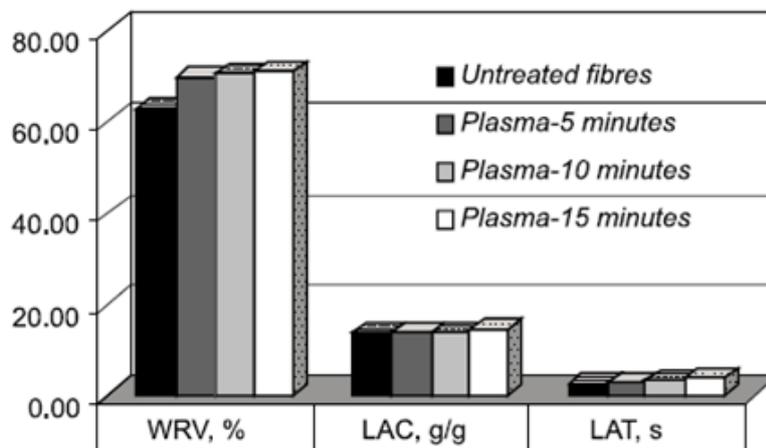


Figure 1- 19 : Taux de rétention d'eau (WRV), capacité d'absorption de liquide (LAC) et temps d'absorption de liquide (LAT) des fibres de viscose avant et après traitement par plasma pendant 5,10 et 15 minutes [VRABIC, 2007]

Vesel et al. [VESEL, 2010] ont traité des tissus de viscose par un plasma radiofréquence (27,12 MHz) à pression réduite sous différents types de gaz plasmagènes pendant 5 secondes. Ils ont remarqué, après traitement, que l'augmentation de la teneur en oxygène à la surface est plus importante si le gaz plasmagène utilisé est du dioxygène comparée à des traitements réalisés sous azote et hydrogène

1.6.1.1.3 Fibres synthétiques

Leroux et al. [LEROUX, 2006], [LEROUX, 2007], [LEROUX, 2009] ont étudié l'impact d'un traitement plasma atmosphérique sous air sur différents matériaux de poly(éthylène téréphtalate) en fonction de la puissance de traitement (TP pour Treatment Power). Ils ont remarqué une diminution de l'angle de contact envers l'eau qui est passé de 80° à 40-50° suivant la structure du matériau (Figure 1-20). De même, ils ont remarqué une augmentation de la capillarité qui est passée d'une valeur presque nulle à 30-50 % pour les non-tissés et de 20 à 80 % pour le tissu après un traitement à une TP de 60 kJ/m² (Figure 1-

21). Ils ont attribué ces améliorations à la création des groupements acide carboxyliques et alcool sur la surface de fibres de polyester. En outre, ils ont constaté que le film et le tissu ont atteint un angle de contact minimal avec l'eau à des faibles valeurs de TP. En revanche, les non-tissés ont nécessité une TP plus importante pour arriver à l'angle de contact minimal. De ce fait, ils ont émis l'hypothèse que la densité de matière du matériau a un impact sur le traitement (Figure 1-22). En effet, lorsque le matériau est très perméable aux gaz, le plasma aura plus de chance de passer dans les pores ouverts de l'échantillon que d'être en contact avec la matière et ainsi il faut une TP plus importante pour atteindre la même intensité de traitement. De plus, les auteurs ont noté que la structure ouverte des non-tissés a permis de traiter les fibres présentes en surface et celles présentes à l'intérieur du matériau presque d'une manière quasi-égale, ce qui n'est pas le cas pour le tissu et le film où l'oxydation des fibres à l'intérieur a nécessité une TP supérieure à celle d'activation des fibres en surface. On note donc l'importance cruciale d'adapter la puissance de traitement à la structure de la matière.

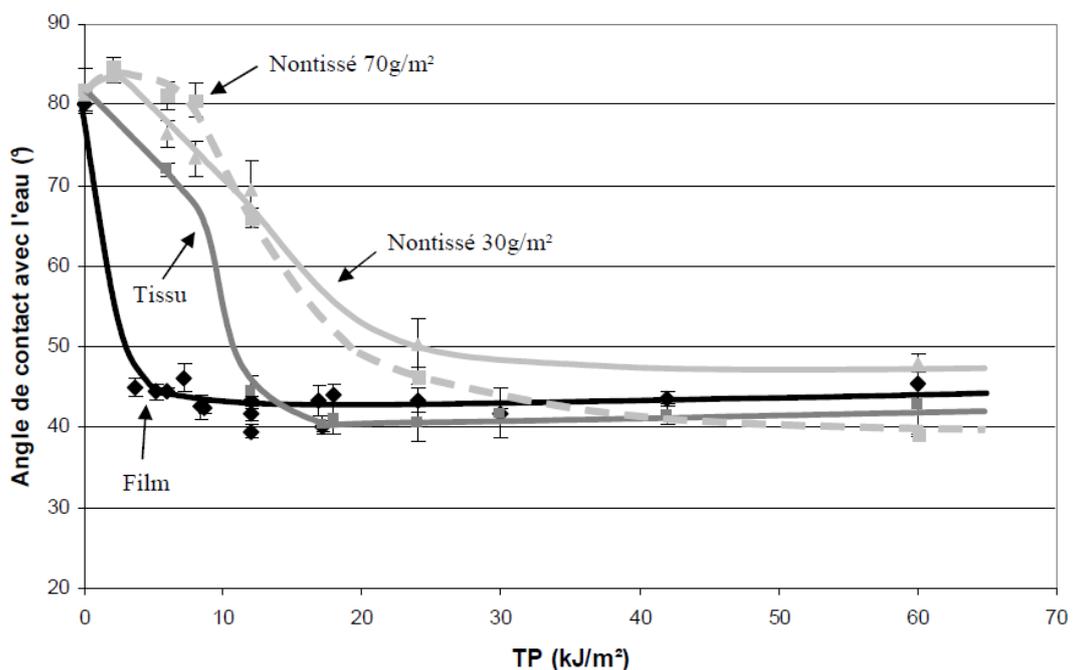


Figure 1- 20 : Evolution de l'angle de contact de divers médias en poly(éthylène téréphtalate) en fonction de la puissance de traitement - en noir pour le film ; en gris foncé pour le tissu et en gris clair pour les non-tissés (30 g/m² : ligne pleine ; 70 g/m² : ligne discontinue) [LEROUX, 2007]

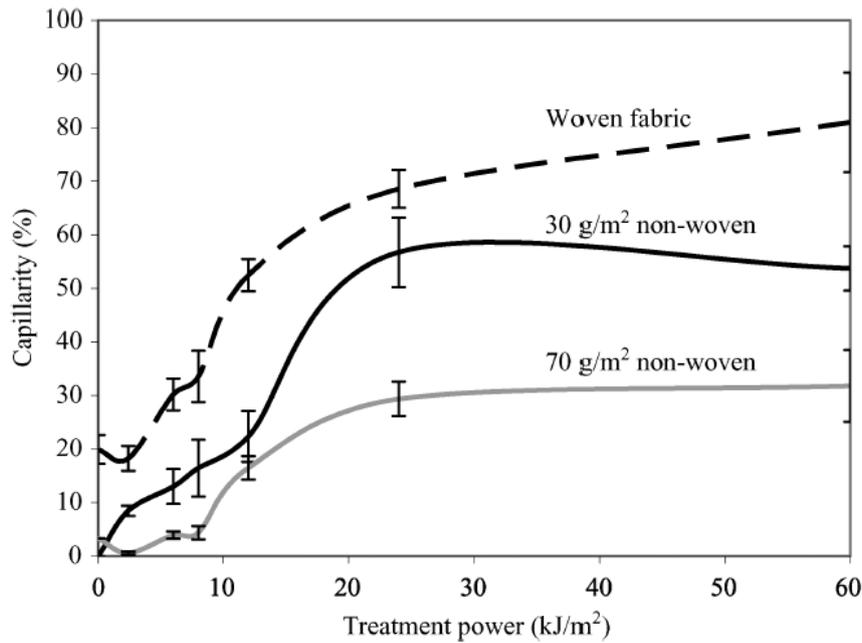


Figure 1- 21 : Evolution de la capillarité avec l'eau du tissu et non-tissés de PET en fonction de la puissance de traitement - en ligne discontinue le tissu ; en ligne gris le non-tissé de 70 g/m² et en ligne noir le non-tissé de 30 g/m² [LEROUX, 2006]

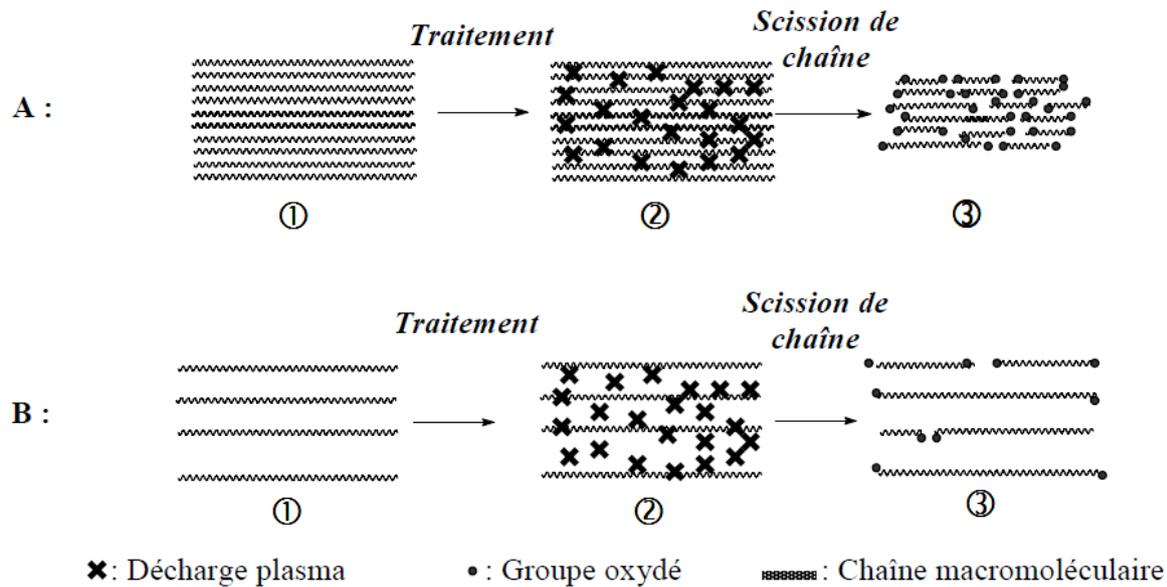


Figure 1- 22 : Hypothèse émise concernant la formation des groupements oxydés pour un matériau ayant A : une forte densité de matière – B : une faible densité de matière [LEROUX, 2007]

Takke et al. [TAKKE, 2009] ont également observé une diminution de l'angle de contact avec l'eau sur un tissu de polyester de 80 à 40° lors d'un traitement plasma à pression atmosphérique sous air (Figure 1-23). De même, ils ont remarqué une augmentation du pouvoir capillaire (Figure 1-24). En outre, ils ont remarqué que les conditions de vieillissement ont une influence sur l'évolution des modifications apportées par plasma. En

fait, lorsque le vieillissement est effectué en absence de lumière, l'angle de contact s'en trouve augmenter de 6° et la capillarité est diminuée de 31 %. Par contre, en présence de lumière, l'angle de contact est augmenté considérablement et atteint 73° après 30 jours de vieillissement et la capillarité diminue de 72 %.

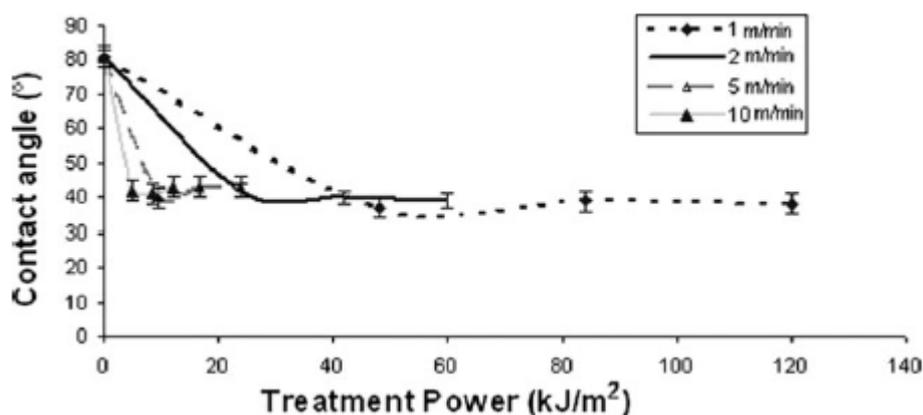


Figure 1- 23 : Evolution de l'angle de contact en fonction de la puissance de traitement plasma [TAKKE, 2009]

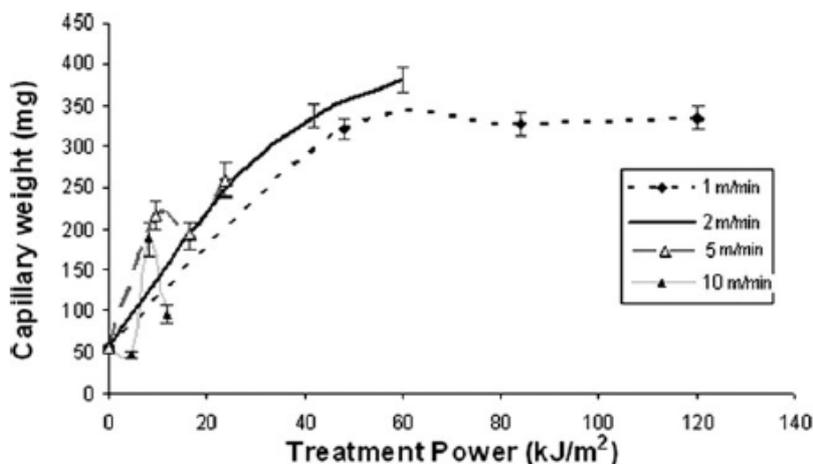


Figure 1- 24 : Evolution de la capillarité de tissu de polyester en fonction de la puissance de traitement (TP) pour des vitesses de 1, 2, 5 et 10 m/min. Pour chaque vitesse, des puissances de 400, 700 et 1000W ont été utilisées [TAKKE, 2009]

Kabajev et al. [KABAJEV, 2004] ont démontré que des traitements par plasma à pression réduite de 13,3 Pa (0,1 Torr) sous air, dioxygène et hélium permettent d'augmenter le pouvoir capillaire des substrats en fibres et microfibres de polyester. En fait, ils ont remarqué une augmentation de la capillarité de substrat en microfibres de PET de 300 % après un traitement de 60 secondes (Figure 1-25). De même, ils ont constaté que plus le temps de traitement est important, plus la capillarité de substrat en fibres de polyester sera grande

(Figure 1-26 (a)). En outre, ils ont remarqué que cette dernière n'est diminuée que de 16-17 % après un mois de vieillissement (Figure 1-26 (b)).

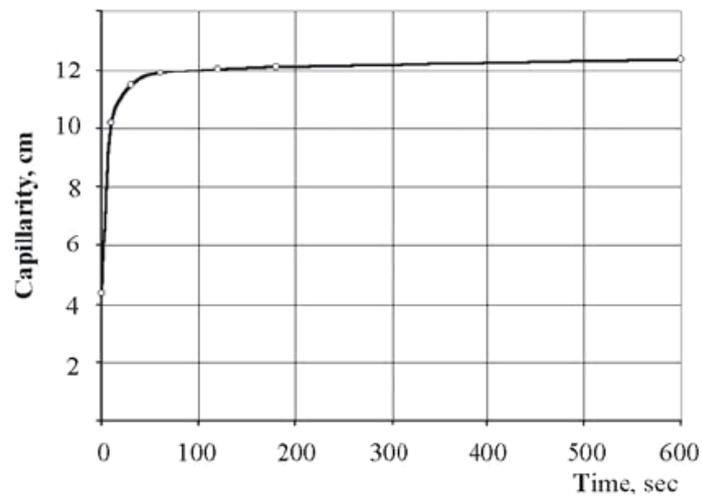


Figure 1- 25 : Evolution de la capillarité de substrat en microfibrilles de PET en fonction du temps de traitement par un plasma d'oxygène [KABAJEV, 2004]

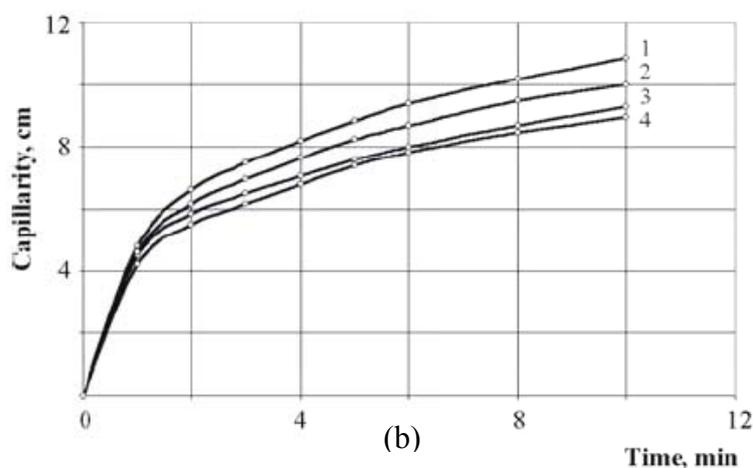
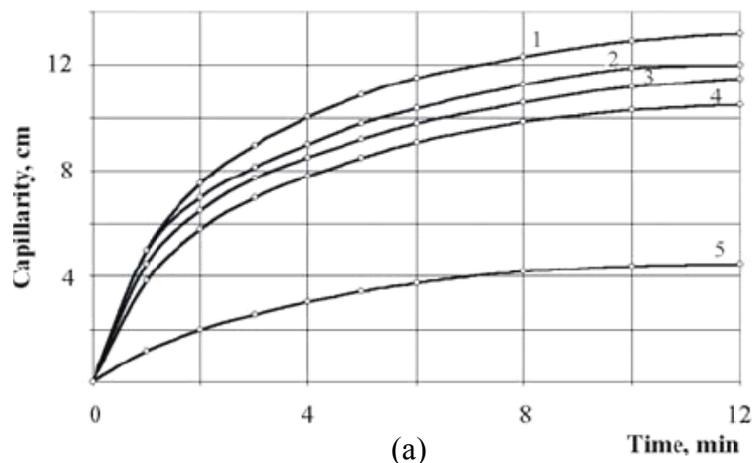


Figure 1- 26 : Capillarité de substrat en fibres de polyester mesurée (a) directement après traitement plasma et (b) après un mois de vieillissement : 1- temps de traitement plasma 10 min, 2- 2 min, 3- 1 min, 4- 10 secondes et 5- non traité [KABAJEV, 2004]

Shin et al. [SHIN, 2006], [SHIN, 2008] ont traité un non-tissé de polyester (PET) de 50 g/m^2 par un plasma à pression atmosphérique utilisant un mélange hélium/dioxygène comme gaz plasmagène. Ils ont remarqué que plus le temps de traitement est important, plus l'hydrophilie du non-tissé sera grande (Figure 1-27). En fait, le temps d'absorption d'une goutte d'eau déposée à la surface du non-tissé est passé de plus d'une heure à 6 minutes, après 90 secondes de traitement. De même, le rapport oxygène/carbone à la surface est passé de 0,37 à 0,46.

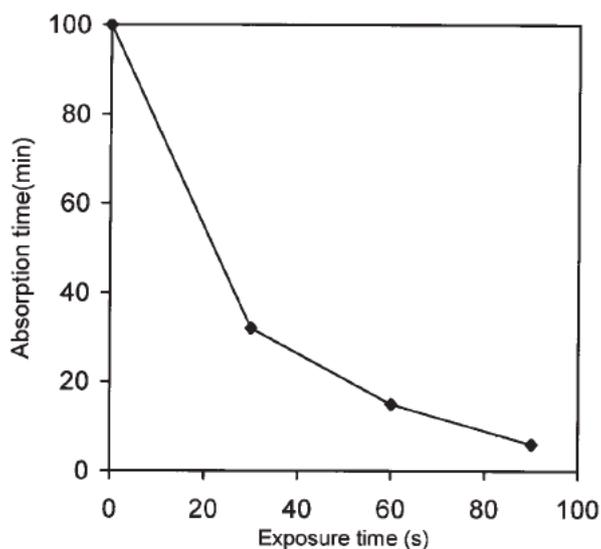


Figure 1- 27 : Evolution de l'hydrophilie du non-tissé de polyester en fonction du temps de traitement plasma [SHIN, 2008]

Les mêmes types de résultats ont été observés par Geyter et al. [GEYTER, 2006] en traitant un non-tissé de polyester de 40 g/m^2 par un plasma de type décharges à barrière diélectrique à une pression de 5 kPa sous air. Ils ont remarqué que l'augmentation de la puissance électrique et/ou du temps de traitement résulte en une amélioration de l'hydrophilie (Figure 1-28). De même, ils ont remarqué que le taux d'oxygène en surface est passé de 25 à 34,2 %. Ils ont attribué ces résultats à l'incorporation des groupements polaires oxydés de type $-(C=O)-$ et $-O-(C=O)-$ en surface. De ce fait, ils ont conclu que la décharge à barrière diélectrique établie dans l'air permet d'activer et modifier efficacement la surface des textiles.

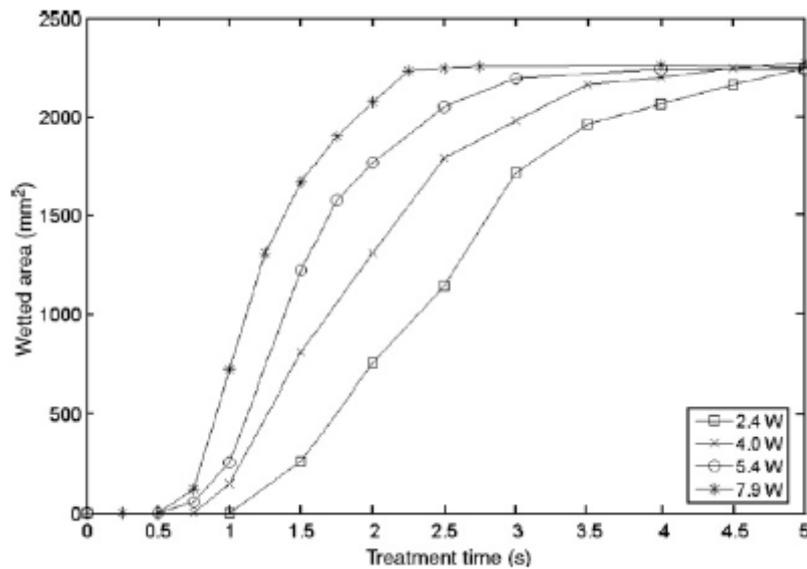


Figure 1- 28 : Evolution de l'hydrophilie du non-tissé de polyester en fonction de la puissance et du temps de traitement [GEYTER, 2006]

Vatuna et al. [VATUNA, 2004] ont comparé des traitements par plasma radiofréquence et des traitements par plasma micro-onde à pression réduite (64 Pa) sous différents types de gaz plasmagènes sur un substrat en polyester. Ils ont remarqué que les traitements par plasma radiofréquence sont plus efficaces que ceux par plasma micro-onde (Figure 1-29). Dans les deux cas, ils ont classé l'efficacité des gaz dans cet ordre : dioxygène > mélanges dioxygène/azote > azote. En outre, en réalisant un traitement par plasma radiofréquence sous air, les auteurs ont remarqué que plus la puissance de traitement est importante, plus l'hydrophilie sera grande (Figure 1-30).

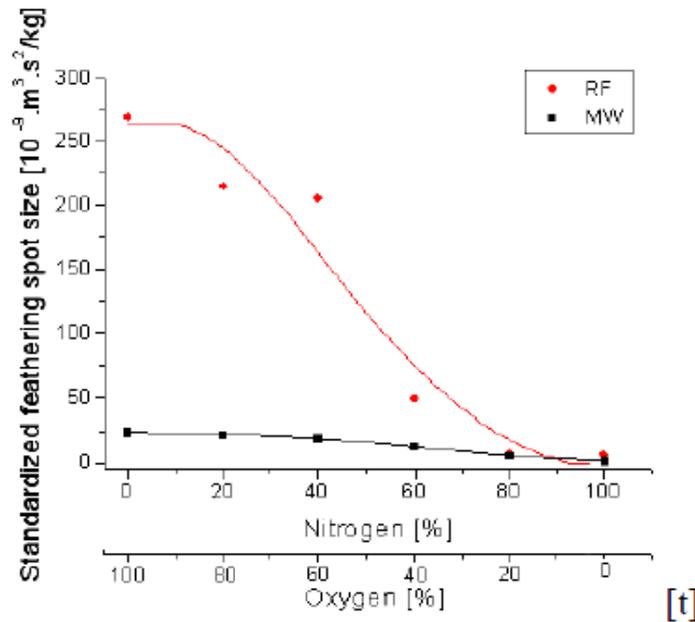


Figure 1- 29 : Evolution de l'hydrophile du substrat de polyester en fonction de type du traitement plasma et de la composition du gaz plasmagène [VATUNA, 2004]

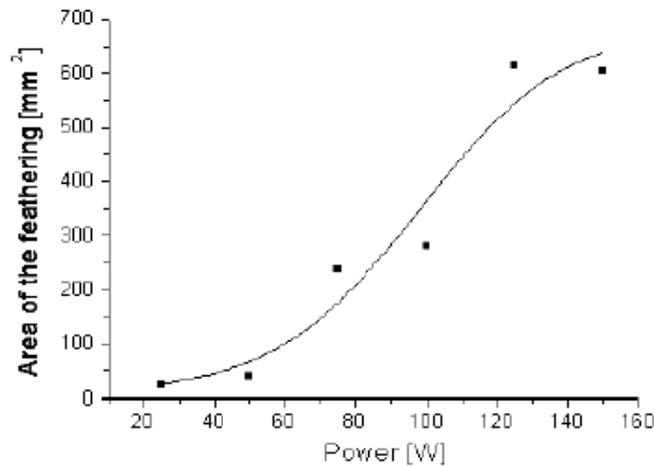


Figure 1- 30 : Evolution de l'hydrophile du substrat de polyester en fonction de la puissance de traitement par plasma radiofréquence sous air [VATUNA, 2004]

Hossain et al. [HOSSAIN, 2006a] ont traité un tissu de polyester de 43,5 g/m² par un plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression réduite sous différents types de gaz (air, CO₂, vapeur d'eau et mélange He/O₂). Ils ont remarqué que l'hydrophilie de tissu dépend de la pression, de la nature du gaz plasmagène, de la puissance électrique et du temps de traitement. En effet, ils ont observé qu'une pression de 10-16 Pa, une puissance de 10-15 W et un temps de traitement de 5 minutes permettent d'atteindre une hydrophilie maximale. De même, ils ont constaté que le mélange He/O₂ est plus efficace que les autres gaz plasmagènes. En outre,

ils ont remarqué que la structure de la matière a une influence sur l'évolution des surfaces modifiées lors du vieillissement [HOSSAIN, 2006b]. En fait, ils ont observé que le traitement des substrats denses donne un vieillissement beaucoup moins stable que celui des substrats moins denses.

D'autres études [WROBEL, 1978], [OKTEM, 2000], [COSTA, 2006], [BORCIA, 2006], [RASHED, 2009], [SAMANTA, 2009], [YAMAN, 2009] ont montré qu'il y a une augmentation de la mouillabilité des tissus en polyester, qu'ils soient traités par plasma à pression réduite sous azote, argon, dioxygène, air, dioxyde de carbone, vapeur d'eau, acide acrylique et ammoniac ou par plasma atmosphérique sous air, dioxygène, azote, hélium, méthane, hydrogène et argon. De même, il a été observé que plus le temps de traitement est important, plus l'hydrophilie sera stable après un traitement de lavage [WROBEL, 1978]. Il en résulte une amélioration de la teinture des fibres de polyester (Figure 1-31) [OKTEM, 2000], [COSTA, 2006], [ZHONGFU, 2007], [WONG, 2007].

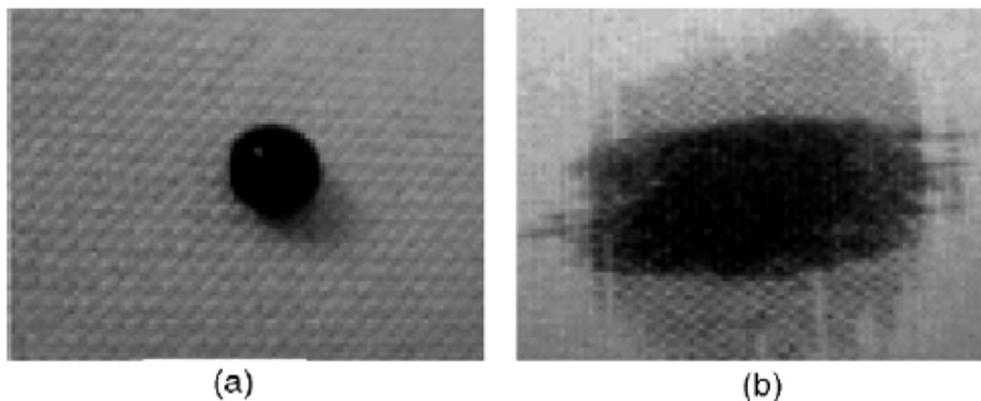


Figure 1- 31 : Goutte de teinture obtenu à la surface d'un tissu de polyester (a) avant traitement et (b) après traitement par plasma atmosphérique sous un mélange H_2 -92%/N₂ [COSTA, 2006]

Pichal et al. [PICHAL, 2006], [PICHAL, 2007] ont comparé l'impact d'un traitement plasma atmosphérique de type décharges à barrière diélectrique sous air sur deux structures textiles en polyester dont l'une est composée d'une seule couche de tissu et l'autre est composée de six couches de tissu disposées en parallèle. Après un traitement de 360 secondes, ils ont remarqué une augmentation plus importante de l'hydrophilie dans le cas du substrat monocouche. De même, ils ont remarqué que l'évolution des surfaces modifiées se fait principalement les 3 premiers jours après traitement. Ensuite, il y'a stabilisation de la

composition chimique de la surface. Au final, ils ont remarqué que les modifications apportées restent stables dans le temps (l'hydrophilie ne diminue que de 10 %) (Figure 1-32).

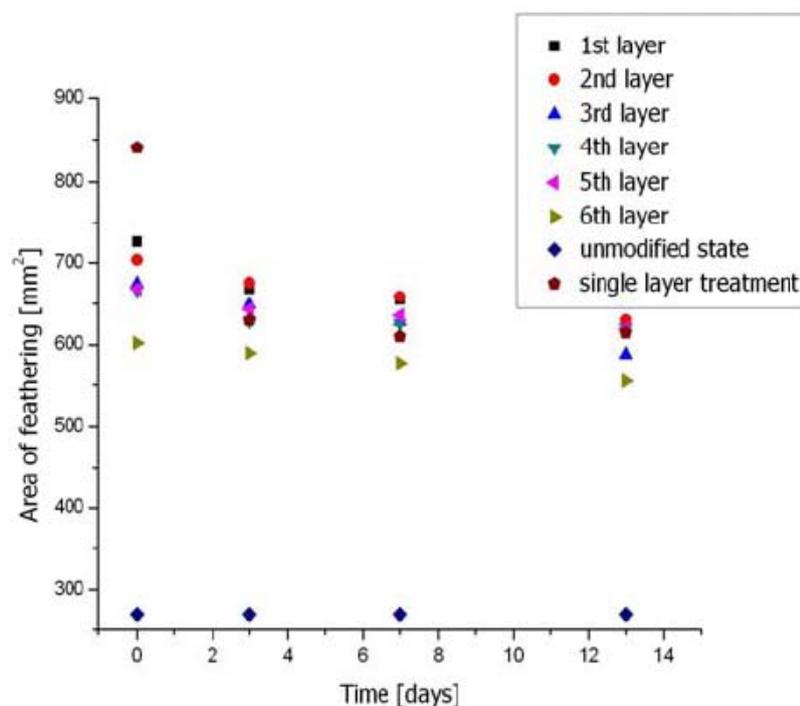


Figure 1- 32 : Evolution de l'hydrophilie de différentes couches en tissu de polyester après traitement plasma en fonction du temps de vieillissement [PICHAL, 2007]

Wang et al. [WANG, 2007a] quant à eux ont comparé l'impact d'un traitement plasma à pression atmosphérique sous un mélange hélium/oxygène sur deux substrats en polyester composés chacun de huit couches de tissu de même épaisseur (0,25 mm). Le tissu utilisé dans le premier substrat présente une taille moyenne de pores de 200 μm , cependant le tissu utilisé dans le second substrat présente une taille moyenne de pores de 100 μm (Figure 1-33).

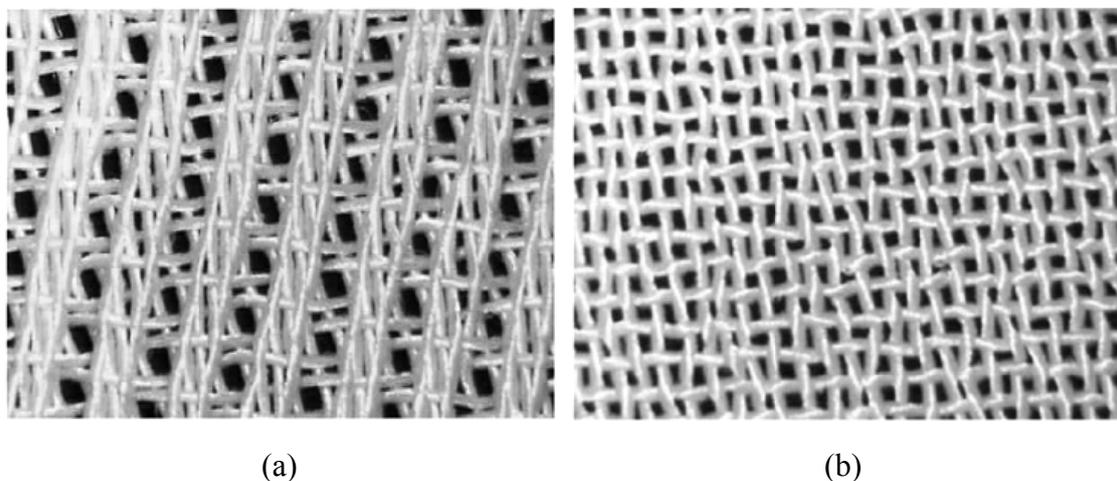


Figure 1- 33 : Images de tissus de polyester ayant une taille moyenne de pores de (a) 200 μm et (b) 100 μm [WANG, 2007a]

Après traitement, ils ont remarqué que la taille moyenne des pores de tissu a un impact sur l'hydrophilie (Figure 1-34) et la capillarité (Figure 1-35) des substrats. Ils ont constaté que les espèces réactives de plasma ont permis de modifier et activer même la huitième couche de substrat de 200 μm . Par contre, dans le cas de substrat de 100 μm , leur effet a été limité à la sixième couche. Ils ont expliqué ce résultat par le fait que plus la taille moyenne des pores est importante, plus il sera aisé aux espèces réactives de plasma de pénétrer plus profondément dans le substrat. Dans les deux cas, ils ont remarqué que l'intensité de traitement diminue graduellement en passant d'une couche à l'autre. Ils ont attribué ceci à la diminution du nombre d'espèces réactives capables de pénétrer en profondeur dans le substrat.

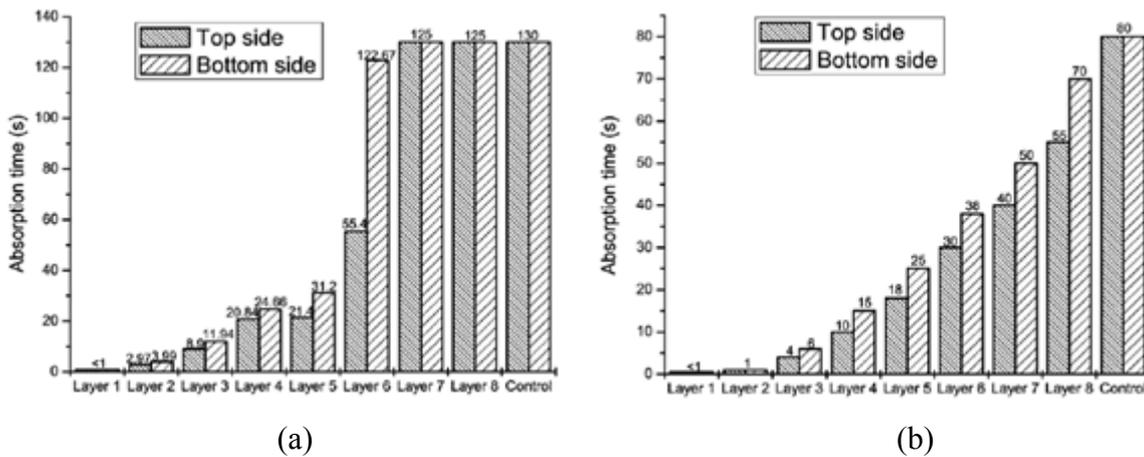


Figure 1- 34 : Temps d'absorption d'une goutte d'eau sur les deux faces des différentes couches en tissu de polyester présentant une taille moyenne de pores de (a) 100 μm et (b) 200 μm , avant et après traitement plasma [WANG, 2007a]

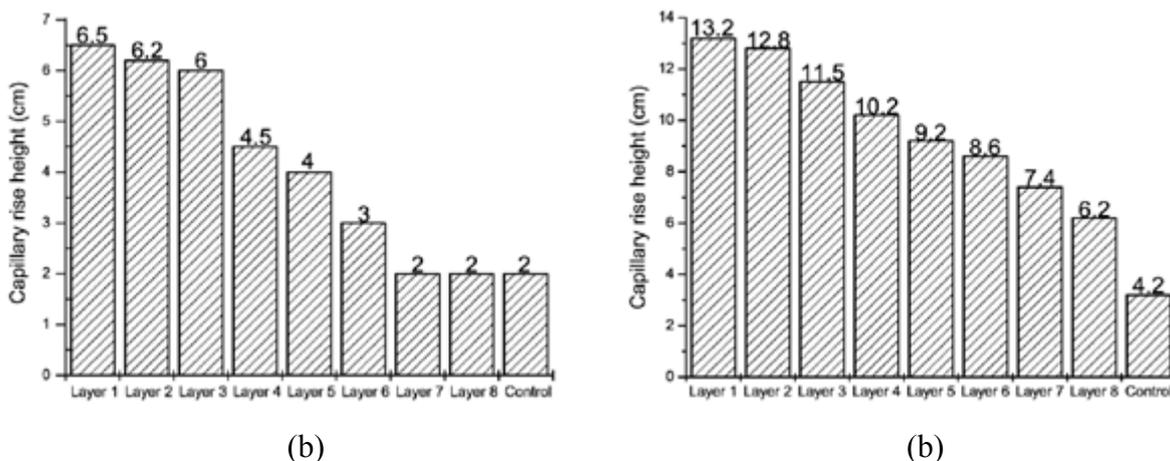


Figure 1- 35 : Hauteur capillaire des différentes couches en tissu de polyester présentant une taille moyenne de pores de (a) 100 μm et (b) 200 μm , avant et après traitement plasma [WANG, 2007a]

Dans une autre étude, Wang et al. [WANG, 2008a] ont remarqué que plus le temps de traitement est important, plus la capillarité de chaque couche de tissu de polyester sera grande (Figure 1-36).

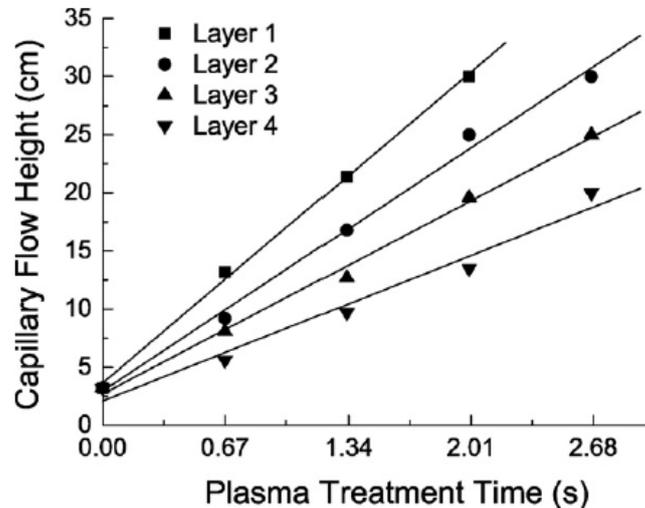


Figure 1- 36 : Evolution de la hauteur capillaire des différentes couches en tissu de polyester, présentant une taille moyenne de pores de 200 μm et une épaisseur de 0,25 mm, en fonction du temps de traitement plasma [WANG, 2008a]

Verschuren et al. [VERSCHUREN, 2005] ont traité des non-tissés en poly(éthylène téréphtalate) et en méta-aramide par un plasma radiofréquence à pression réduite sous dioxygène, avant et après nettoyage. Pour évaluer la capillarité, ils ont répété les manipulations de mesure trois fois sur chaque échantillon : la première mesure a été effectuée après traitement plasma, la deuxième mesure a été effectuée après séchage de l'échantillon et la troisième mesure a été effectuée après lavage de l'échantillon. Dans le cas où les non-tissés n'ont pas été nettoyés avant traitement, ils ont remarqué que la présence de contaminants à la surface a entraîné une augmentation de la capillarité (Figure 1-37). Après traitement plasma, ils ont remarqué que l'augmentation de la capillarité est plus importante si les non-tissés ont subi un nettoyage préalable (Figure 1-38). En répétant les mesures de capillarité sur le même échantillon, ils ont observé que la diminution du pouvoir capillaire est plus importante pour les non-tissés non nettoyés. Ils ont expliqué ce résultat par le fait qu'en présence des contaminants les groupements polaires créés par le plasma sont faiblement attachés à la surface et peuvent être éliminés facilement par un simple lavage. En revanche, lorsque le substrat est propre, les groupements créés sont mieux attachés à la surface et ne peuvent pas être éliminés facilement.

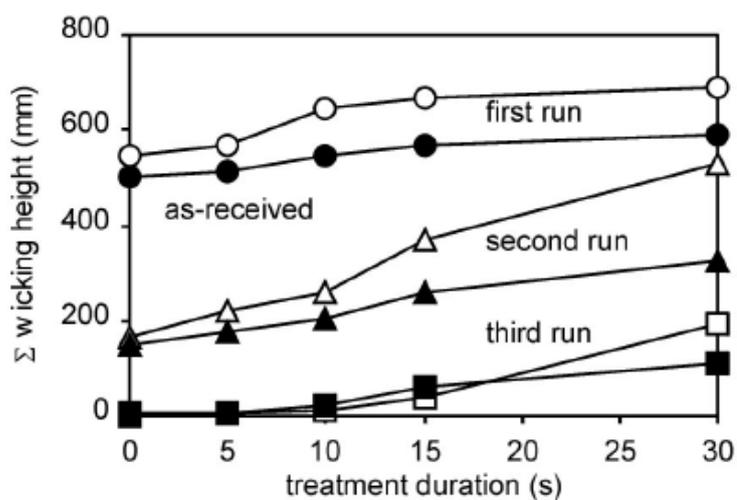


Figure 1- 37 : Evolution de la capillarité des non-tissés en poly(éthylène téréphtalate) (O, Δ, □) et en méta-aramide (●, ▲, ■) avant nettoyage en fonction du temps de traitement plasma et du nombre de mesures [VERSCHUREN, 2005]

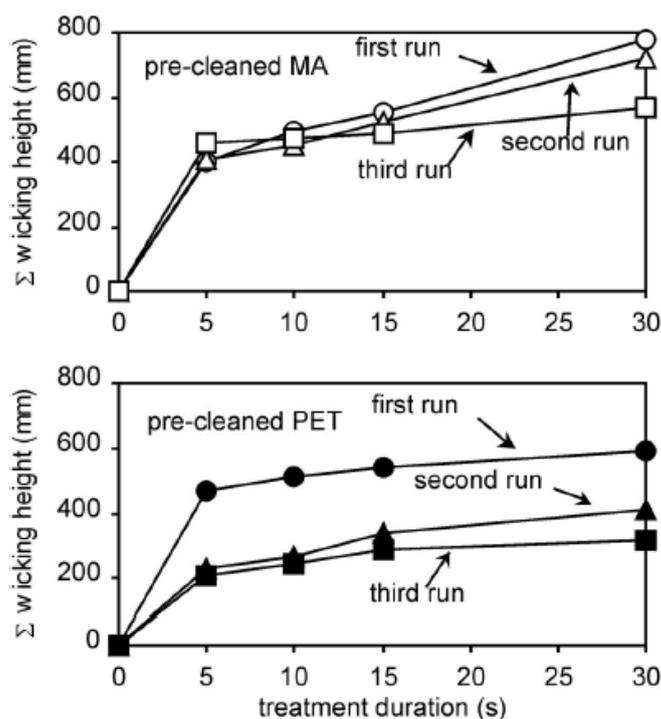


Figure 1- 38 : Evolution de la capillarité des non-tissés en poly(éthylène téréphtalate) et en méta-aramide après nettoyage en fonction du temps de traitement plasma et du nombre de mesures [VERSCHUREN, 2005]

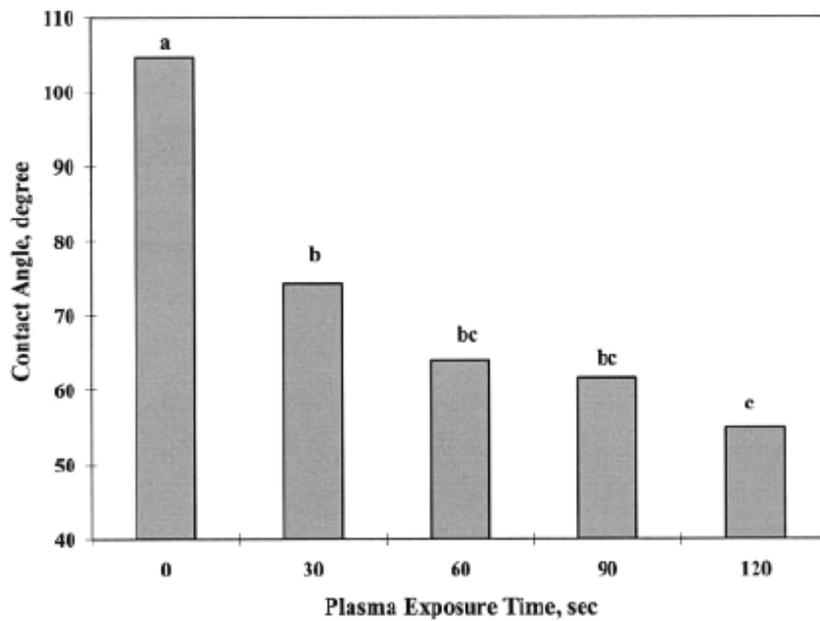
Morent et al. [MORENT, 2007] ont étudié l'impact des traitements par plasma de type décharges à barrière diélectrique à une pression de 5 kPa sous air, argon et hélium sur des non-tissés en poly(éthylène téréphtalate) et en polypropylène. Dans tous les cas, ils ont remarqué une augmentation de la capillarité qui est passée de 106 à 360 % pour le

polypropylène et de 393 à 730 % pour le poly(éthylène téréphtalate). En utilisant le même type de gaz, ils ont remarqué que le polypropylène a nécessité une densité d'énergie plus importante que celle du polyester pour atteindre une capillarité maximale. En outre, ils ont constaté que le traitement réalisé sous air donne un vieillissement beaucoup moins stable que celui réalisé sous argon.

Borcía et al. [BORCIA, 2006] ont montré que des traitements par un plasma de type décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique sous air, argon et azote permettent d'augmenter l'hydrophilie d'un tissu de polyamide même après un temps de traitement de l'ordre de quelques fractions de seconde. De même, Samanta et al. [SAMANTA, 2009] ont observé une augmentation de l'énergie de surface d'un tissu en polyamide (nylon-6) de 44,5 à 63 mJ/m² lors d'un traitement plasma atmosphérique d'une minute sous hélium. En outre, Oktem et al. [OKTEM, 2000] ont observé que l'hydrophilie d'un tissu de polyamide traité par plasma à pression réduite n'a subi qu'une légère variation après un vieillissement de six mois.

McCord et al. [MCCORD, 2002] ont comparé l'impact d'un traitement par plasma atmosphérique de type décharges à barrière diélectrique sous un mélange dioxygène/hélium sur un tissu en polyamide et un non-tissé en polypropylène. Ils ont remarqué que l'oxydation de surface de tissu de polypropylène est plus importante que celle de polyamide. En effet, ils ont observé que le taux d'oxygène en surface est passé de 4,3 à 14,7 % pour le polypropylène et de 11 à 14,5 % pour le polyamide. De même, le rapport O/C est passé de 0,045 à 0,177 dans le premier cas et de 0,121 à 0,169 dans le second cas. Ils ont attribué cette différence à la structure moléculaire des dits matériaux.

Hwang et al. [HWANG, 2005] ont traité un non-tissé de polypropylène par un plasma atmosphérique sous hélium. Ils ont remarqué que plus le temps de traitement est important, plus l'angle de contact envers l'eau sera faible (Figure 1-39). De même, ils ont constaté que le teneur en oxygène est augmenté de 0,7 à 12,5 % et que le rapport O/C est augmenté de 0,01 à 0,15 après 2 minutes de traitement.



^{ab} Means with different letters are statistically significantly different at $p < 0.05$.

Figure 1- 39 : Evolution de l'angle de contact d'un non-tissé de polypropylène en fonction du temps de traitement plasma [HWANG, 2005]

Yaman et al. [YAMAN, 2009] ont étudié l'impact des traitements par un plasma atmosphérique sous air et argon sur un tissu de polypropylène en fonction de la puissance et du temps de traitement. Ils ont remarqué, après traitement, une diminution de l'angle de contact avec l'eau et une augmentation du pouvoir capillaire. De même, ils ont remarqué que plus la puissance électrique ou le temps de traitement augmente, plus l'angle de contact sera faible et la hauteur capillaire sera grande (Figure 1-40).

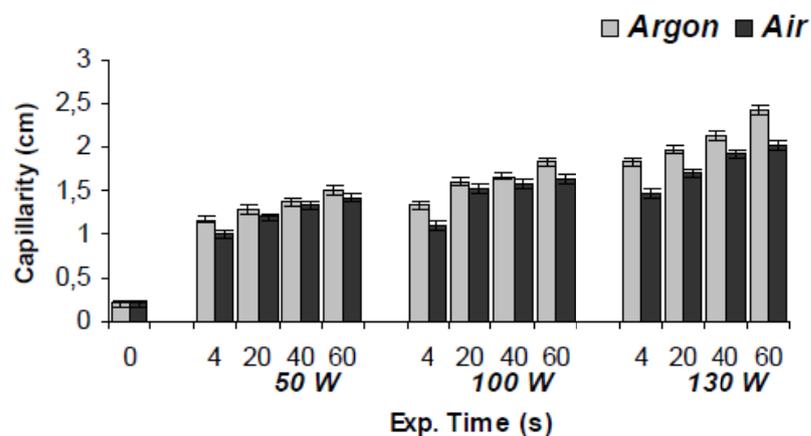


Figure 1- 40 : Evolution de la hauteur capillaire d'un tissu de polypropylène en fonction de la puissance électrique et du temps de traitement plasma [YAMAN, 2009]

Wei et al. [WEI, 2006] ont traité des non-tissés de type aiguilleté et meltblown en polypropylène de 300 g/m^2 par un plasma à pression réduite sous dioxygène. Dans les deux

cas, ils ont remarqué une augmentation de la capillarité avec le temps du traitement. Cette augmentation est plus importante pour le non-tissé meltblown (Figure 1-41). Ils ont attribué cette différence à la finesse des fibres.

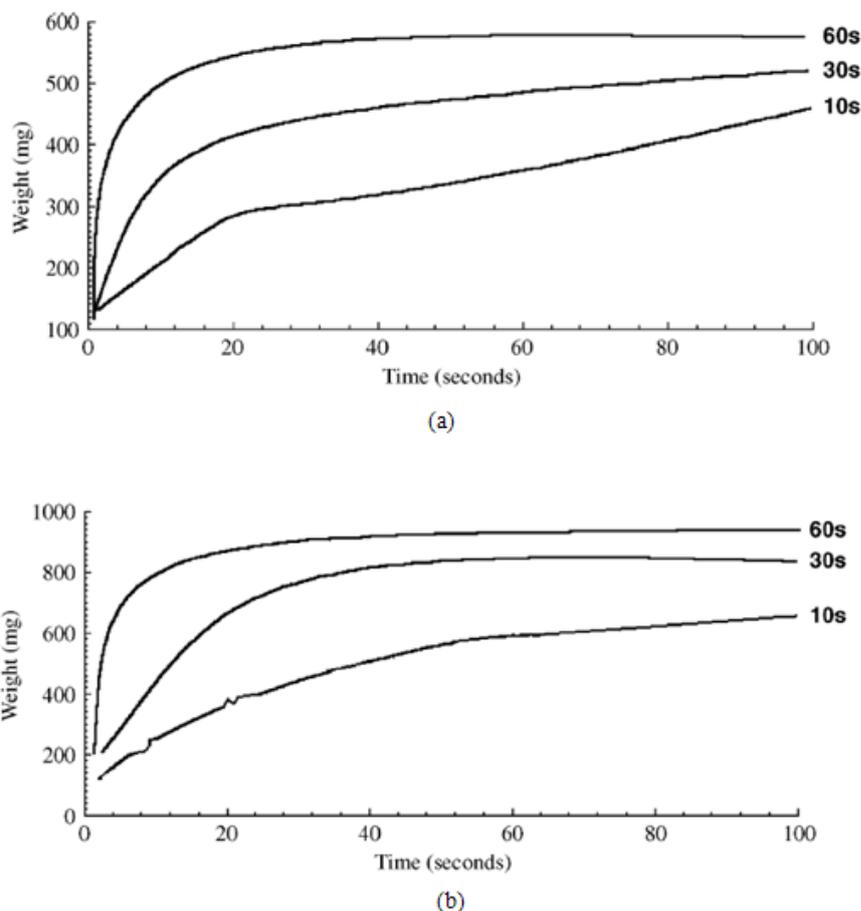


Figure 1- 41 : Evolution de la capillarité des non-tissés (a) aiguilleté et (b) meltblown en fonction du temps [WEI, 2006]

Rosace et al. [ROSACE, 2008] ont étudié l'impact des traitements par plasma à pression réduite sous différents types de gaz plasmagènes sur un tricot composé d'un mélange polyamide/polyuréthane (PA/PU). Ils ont remarqué que la nature du gaz plasmagène, la pression, la puissance électrique et le temps de traitement ont une influence sur la capillarité de ce tricot. En effet, ils ont constaté qu'une pression de 0,08 mbar (Figure 1-42), une puissance de 1000 W (Figure 1-43) et un temps de traitement de 125 secondes (Figure 1-44) permettent d'atteindre une capillarité maximale. De même, ils ont remarqué que le traitement est plus efficace si le dioxygène est utilisé par comparaison à l'air et au dioxyde de carbone (CO₂). Au final, ils ont conclu que les traitements plasma permettent d'activer et modifier efficacement la surface des mélanges textiles.

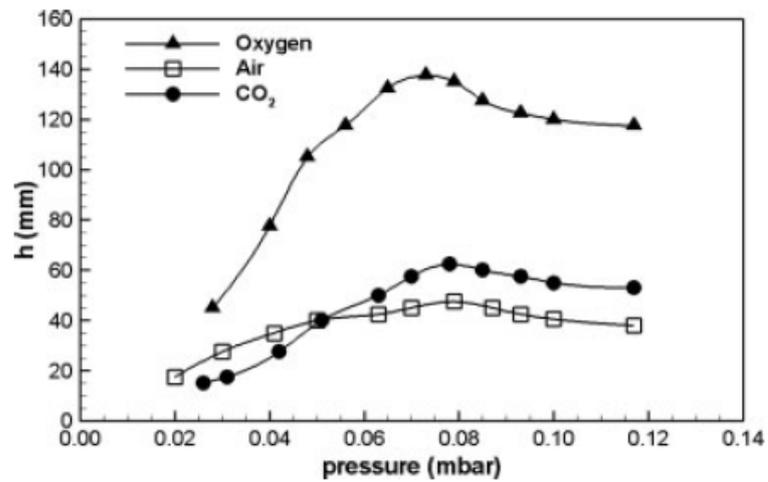


Figure 1- 42 : Evolution de la capillarité de tricot RA/PU en fonction de la pression et de type de gaz plasmagène (1000 W ; 60 secondes) [ROSACE, 2008]

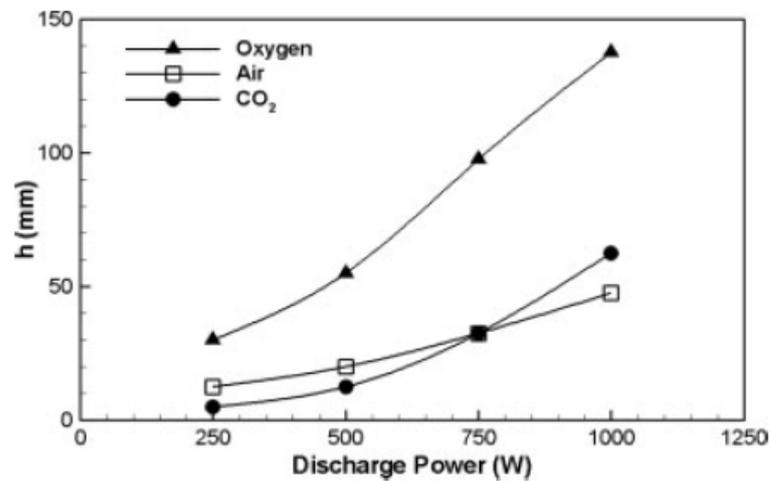


Figure 1- 43 : Evolution de la capillarité de tricot RA/PU en fonction de la puissance et de type de gaz plasmagène (0,08 mbar ; 60 secondes) [ROSACE, 2008]

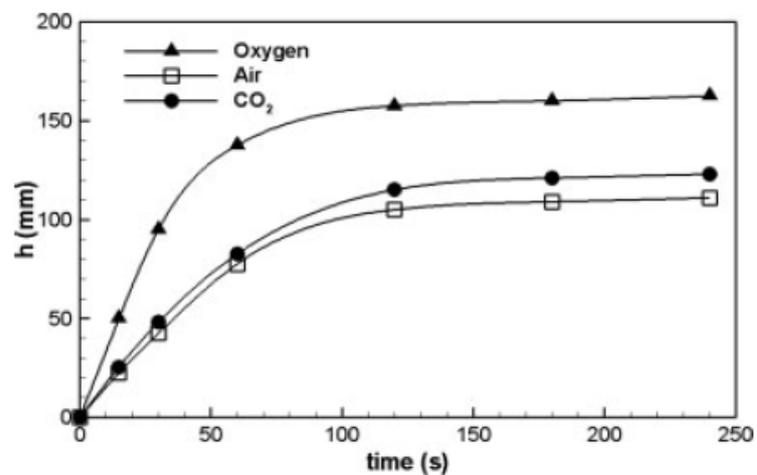


Figure 1- 44 : Evolution de la capillarité de tricot RA/PU en fonction du temps de traitement et de type de gaz plasmagène (0,08 mbar ; 1000 W) [ROSACE, 2008]

Ferreira et al. [FERREIRA, 2008] ont traité un non-tissé en acide poly(lactide) (PLA) par un plasma atmosphérique utilisant l'air comme gaz plasmagène. Ils ont remarqué une diminution de l'angle de contact vers l'eau de 90 à 40° et une augmentation de la capillarité de 0 à 160 %. A l'échelle des fibres, Pappas et al. [PAPPAS, 2006] ont observé que des traitements par plasma atmosphérique sous N₂ et un mélange C₂H₂/He permettent d'augmenter l'énergie de surface des fibres de polyamide. De même, Wang et al. [WANG, 2008b], [WANG, 2008c] ont observé une diminution de l'angle de contact de l'eau sur des fibres en polyéthylène et en polyamide lors d'un traitement plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression atmosphérique sous hélium. Il en résulte une amélioration de l'intensité de la coloration [WANG, 2008c].

En conclusion, les résultats publiés montrent que les traitements plasma sont capables d'activer l'oxydation de la surface des matériaux textiles. Cette oxydation semble être influencée par de nombreux facteurs tels que la pression, la nature du gaz plasmagène, le débit et la composition chimique du gaz, le temps de traitement, la puissance électrique, la nature chimique du substrat, la densité de la matière, la finesse des fibres, la porosité du média à traiter, l'humidité et la propreté de la surface. L'étude de l'effet de ces paramètres constitue donc la clé pour une meilleure compréhension des interactions plasma-surface.

En plus de l'activation de la surface, les traitements plasma offrent en outre la possibilité de conférer des propriétés hydrophobes aux textiles. Ceci fait l'objet de la section suivante, où nous allons passer en revue quelques travaux qui ont étudié l'hydrophobisation de la surface des textiles par plasma afin de donner une idée sur les effets engendrés par ce type de traitement.

1.6.1.2 Obtention des surfaces hydrophobes

Les traitements plasma peuvent également diminuer l'énergie de surface des textiles et les rendre hydrophobes. Les gaz plasmagènes utilisés dans ce cas sont les plus souvent de type fluorés ou bien contenant des monomères fluorés et siliconés.

1.6.1.2.1 Fibres naturelles

Hocker [HOCKER, 2002] ont montré que le traitement par un plasma d'oxygène avec comme monomère 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°. Le même résultat a été obtenu par Godwin et al. [GOODWIN, 2002] après avoir traité un tissu de coton par pulvérisation de polydimethylsiloxane dans un plasma d'hélium. En effet, le tissu a atteint un angle de contact avec l'eau de 140° (Figure 1-45). De même, Sun et al. [SUN, 2006] ont remarqué une augmentation de l'angle de contact avec l'eau sur des tissus en coton et en laine lors d'un traitement par plasma à pression réduite sous hexafluoroéthane (C₂F₆). Ils ont attribué ce caractère hydrophobe à la création de groupements fluorés en surface.

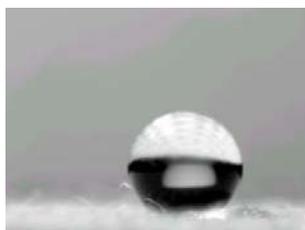


Figure 1- 45 : Goutte d'eau obtenue à la surface d'un tissu de coton après traitement plasma [GOODWIN, 2002]

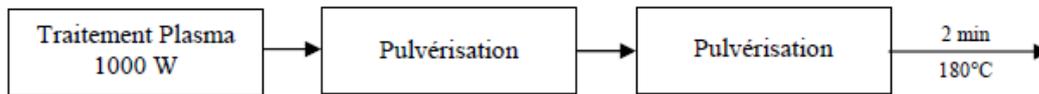
Les mêmes types de résultats ont été observés par Chaivan et al. [CHAIVAN, 2005] et Supasai et al. [SUPASAI, 2007] en traitant des tissus de soie par un plasma à pression réduite utilisant l'hexafluorure de soufre (SF₆) comme gaz plasmagène.

1.6.1.2.2 Fibres synthétiques

Leroux et al. [LEROUX, 2007], [LEROUX, 2008] ont traité un tissu de poly(éthylène téréphtalate) (PET) par un plasma atmosphérique de type décharges à barrière diélectrique sous air selon deux séquences différentes : dans la première séquence l'aérosol est pulvérisé sur le tissu hors décharge et dans la deuxième, l'aérosol est pulvérisé dans la décharge (Figure 1-46). Dans les deux cas, ils ont remarqué une augmentation de l'angle de contact avec l'eau qui est passé de 55 à 141°, mais ils ont observé que pour la séquence 1, la goutte est tout de même rapidement absorbée. Après des cycles de lavage du tissu traité, ils ont constaté après la séquence 1 une baisse importante de l'angle de contact qui est passé de 130° à 60° après un seul cycle de lavage. Par contre, après la séquence 2, l'angle de contact n'a subit qu'une

légère baisse après cinq cycles de lavage et c'est qu'au cinquième cycle que la goutte est absorbée en moins d'une minute (Figure 1-47). Ces résultats montrent bien que sans la décharge plasma le dépôt de fluoropolymère ne tient pas bien à la surface du tissu, alors que, lorsque l'aérosol est pulvérisé dans la décharge, le tissu reste déperlant jusqu'au cinquième cycle de lavage. Il est donc clair qu'un simple prétraitement du tissu par une décharge plasma seule ne permet pas l'accroche de fluoropolymère seul pulvérisé par la suite. Par contre, l'activation de fluoropolymère par la décharge plasma permet d'obtenir une liaison plus importante entre le PET et fluoropolymère.

SEQUENCE 1:



SEQUENCE 2:

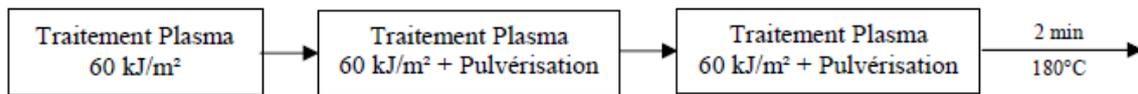


Figure 1- 46 : Séquences de traitements réalisées sur le tissu de PET [LEROUX, 2007]

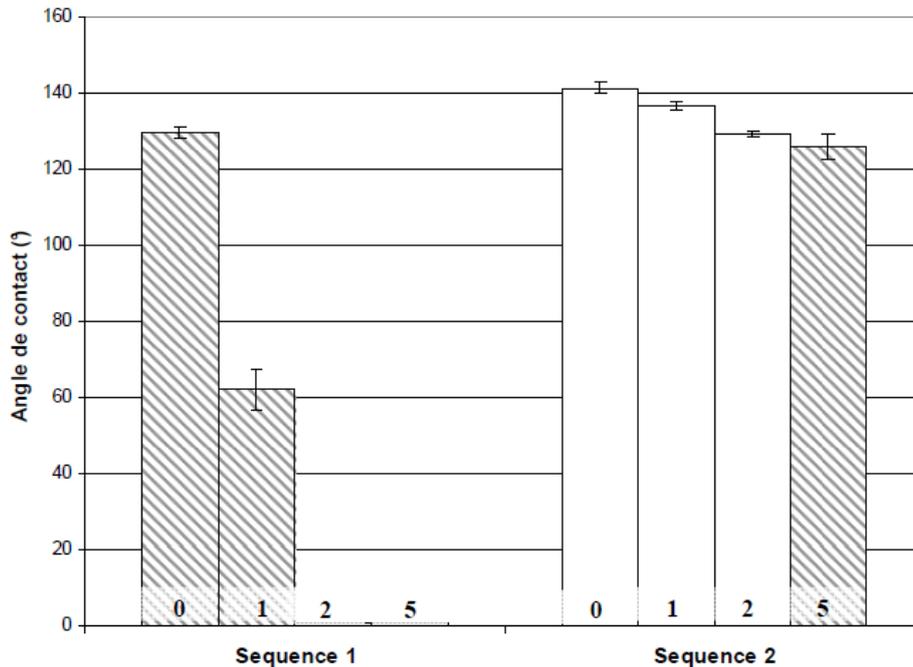


Figure 1- 47 : Angles de contact avec l'eau obtenus pour le tissu de PET traité selon les séquences 1 et 2, le chiffre en bas indique le nombre de lavages et les hachures indiquent lorsque la goutte est absorbée en moins d'une minute [LEROUX, 2007]

Supasai et al. [SUPASAI, 2007] ont observé une augmentation de l'angle de contact entre un tissu de poly(éthylène téréphtalate) et l'eau lors d'un traitement par plasma radiofréquence à pression réduite sous hexafluorure de soufre (SF_6) pendant 1 minute (Figure 1-48). Ils ont attribué ce résultat à la création des groupements de type $-\text{CF}$ en surface.

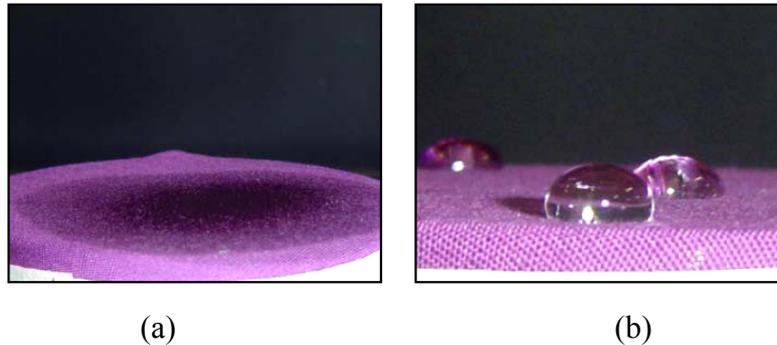


Figure 1- 48 : Photographie des angles de contacts obtenus à la surface d'un tissu de PET (a) avant traitement et (b) après traitement par plasma sous SF_6 [SUPASAI, 2007]

Ainsi, le procédé plasma peut être utilisé pour contrôler l'énergie de la surface. Des surfaces hydrophobes et hydrophiles peuvent être créées par le biais d'un traitement plasma. Toutefois, la fonctionnalisation de la surface peut être accompagnée par des modifications morphologiques nanométriques. Ce point fait l'objet de la section suivante, où nous allons présenter quelques travaux qui ont étudié la modification topographique de la surface après traitement plasma, afin de déterminer l'influence des paramètres opératoires sur les résultats du traitement.

1.6.2 Modifications physiques de surface

Les traitements par plasma peuvent entraîner des modifications de la structure physique des surfaces textiles. Ces modifications résultent du bombardement de la surface par les espèces énergétiques du plasma. En fait, ces dernières peuvent modifier la surface au moment de leur impact soit par échauffement, soit par élimination des atomes de la couche superficielle du matériau.

1.6.2.1 Fibres naturelles

Karahan et al. [KARAHAN, 2008], [KARAHAN, 2009] ont étudié l'impact des traitements par plasma de type décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique sur

les propriétés physiques des tissus en coton. Ils ont remarqué une modification de la topographie de surface. Cette modification est plus marquée si le gaz plasmagène utilisé est l'argon comparé au traitement réalisé sous air (Figure 1-49).

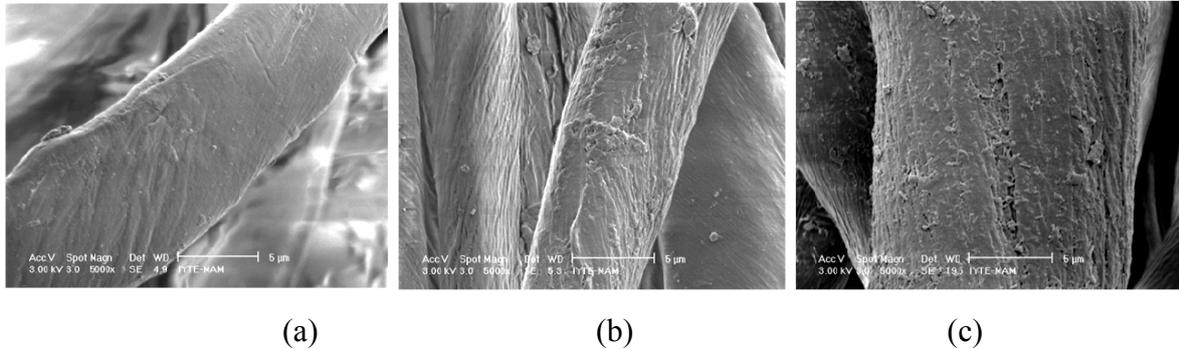


Figure 1- 49 : Images MEB des fibres de coton (a) non traitées ; (b) traitées sous air (130 W, 60 secondes) ; et (c) traitées sous argon (130 W ; 60 secondes) [KARAHAN, 2008]

En comparant des traitements par corona et par plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression réduite, Radetic et al. [RADETIC, 2009] ont montré que suivant le traitement utilisé l'impact sur le tissu de coton sera différent. En effet dans les deux cas, il y a apparition de stries à la surface de fibres, mais dans le cas de plasma radiofréquence, il y a en plus création de microfissures et de micro-cratères en surface (Figure 1-50). En outre, ils ont constaté que le traitement corona permet d'augmenter la force de rupture de tissu dans le sens trame et chaîne. Par contre, les traitements plasma radiofréquence permettent une augmentation de la force de rupture dans le sens trame et une diminution de cette force dans le sens chaîne. Ils ont attribué cette diminution aux altérations topographiques en surface (Figure 1-50 (g, h)). En outre, ils ont remarqué que plus la puissance électrique et le temps de traitement sont importants, plus la surface devient rugueuse.

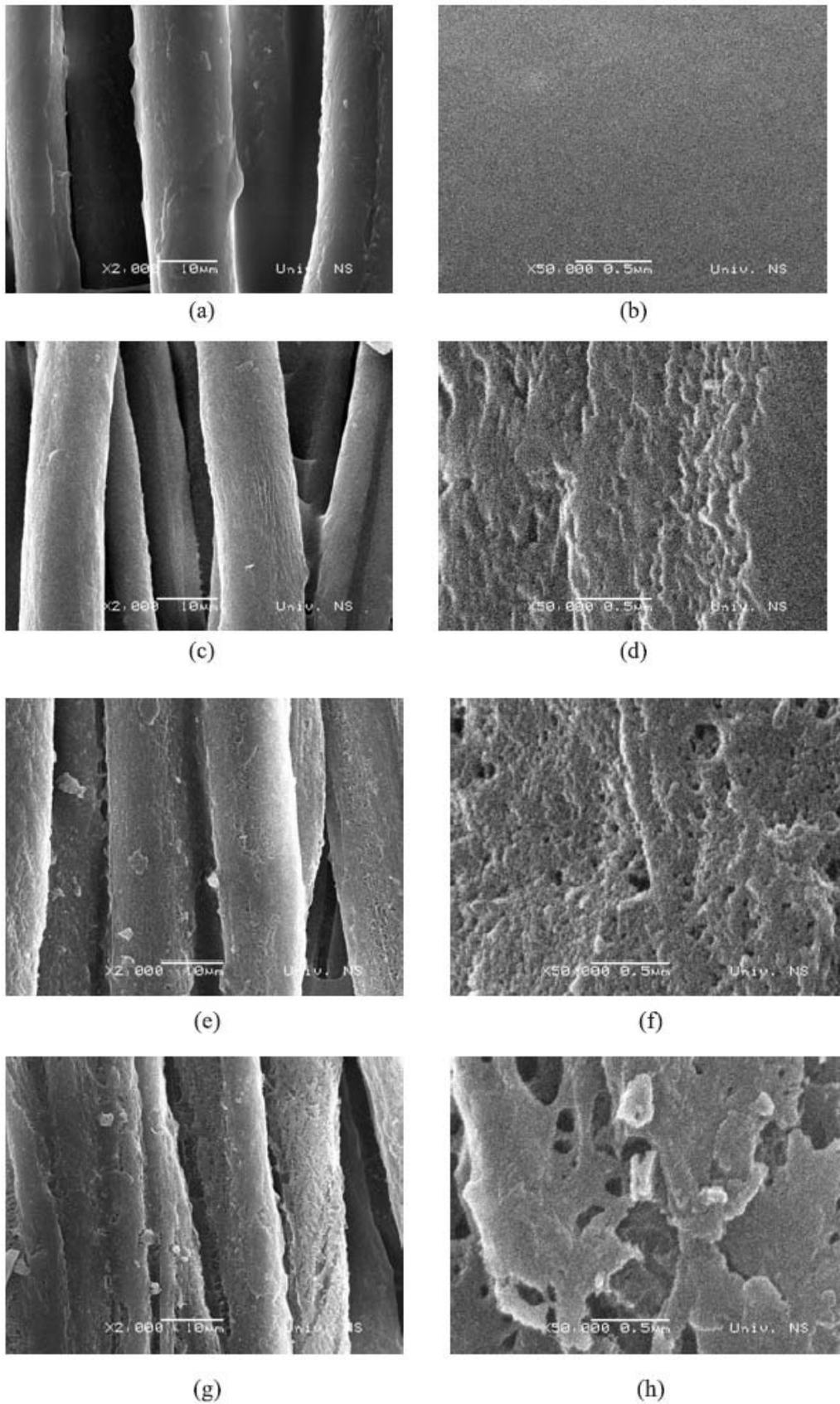


Figure 1- 50 : Images MEB de surface des fibres de coton (a, b) non traitées ; (c, d) traitées par corona (1000 W ; 45 passages) ; (e, d) traitées par plasma radiofréquence sous argon (300 W ; 15 min) ; (g, h) traitées par plasma radiofréquence sous air (300 W ; 15 min) [RADETIC, 2009]

Sun et al. [SUN, 2005], [SUN, 2006] ont traité des tissus de coton et de laine par des traitements plasma à pression réduite pendant 3 minutes. Ils ont remarqué une augmentation de la rugosité de 10 % pour le coton et de 19 % pour la laine si le traitement est réalisé sous dioxygène (Figure 1-51). Par contre, si le hexafluoroéthane (C_2F_6) est utilisée comme gaz plasmagène, ils ont remarqué une augmentation de la rugosité pour des faibles débits de gaz et une diminution de cette dernière pour des débits élevés (Figure 1-52). A titre d'exemple, un débit de gaz de 0,1 SLM a entraîné une diminution de la rugosité de 12 % pour le coton et de 14 % pour la laine.

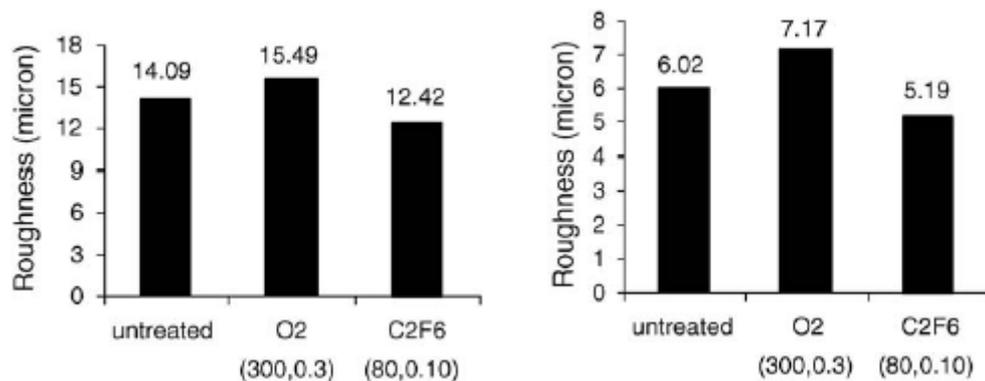


Figure 1- 51 : Rugosité de surface de (a) coton et de (b) laine obtenue avant et après traitement plasma sous O_2 et C_2F_6 [SUN, 2006]

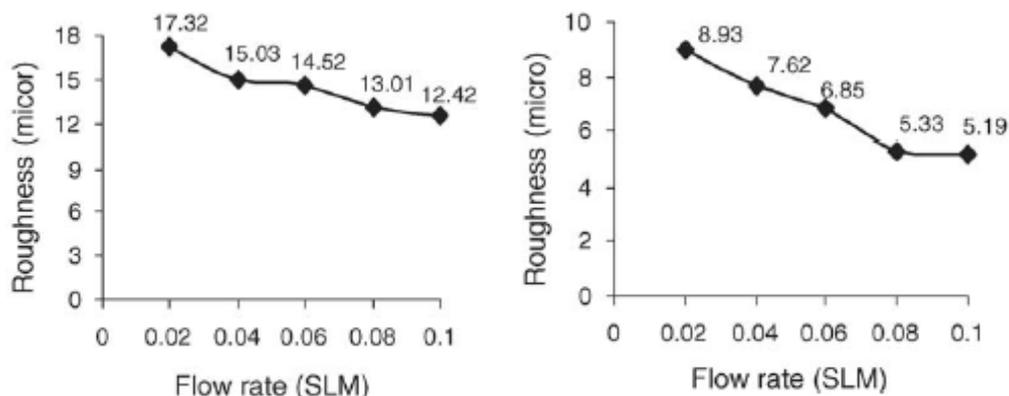


Figure 1- 52 : Rugosité de surface de (a) coton et de (b) laine obtenue avant et après traitement plasma sous C_2F_6 en fonction de débit du gaz [SUN, 2006]

Kan et al. [KAN, 1999] ont étudié l'impact d'un traitement plasma de type radiofréquence (13,56 MHz) à pression réduite (10 Pa) sous dioxygène pendant 5 minutes sur la topographie de surface des fibres de laine. Ils ont remarqué qu'il y a cassure des écailles de laine ainsi que l'apparition des rainures longitudinales (Figure 1-53). Il en résulte une réduction de l'aptitude au feutrage des fibres de laine [KAN, 2005], [KAN, 2006].

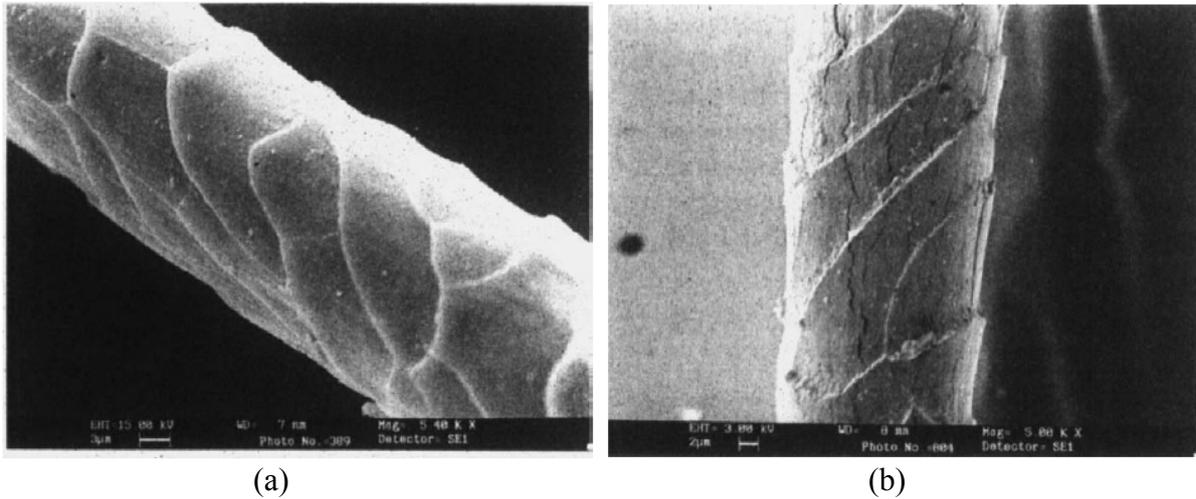


Figure 1- 53 : Images MEB des fibres de laine (a) non traitées et (b) traitées par plasma sous dioxygène pendant 5 minutes [KAN, 1999]

Kulyk et al. [KULYK, 2008] ont également montré qu'il y'a cassure des écailles de la laine lors d'un traitement par plasma de type décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique sous air (Figure 1-54).

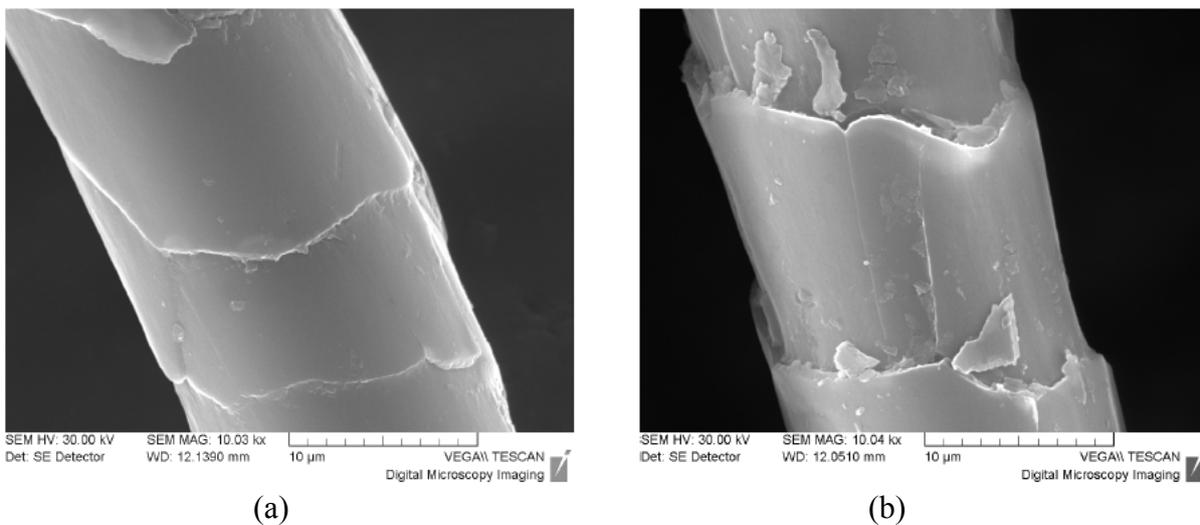


Figure 1- 54 : Images MEB des fibres de laine (a) non traitées et (b) traitées par plasma atmosphérique sous air [KULYK, 2008]

Cai et al. [CAI, 2006a] ont traité un tricot de laine par un plasma atmosphérique sous des mélanges air/hélium et dioxygène/hélium pendant 3 minutes. Dans les deux cas, ils ont remarqué une augmentation de la rugosité de surface des fibres à cause de micro-gravures engendrées par le traitement (Figure 1-55).

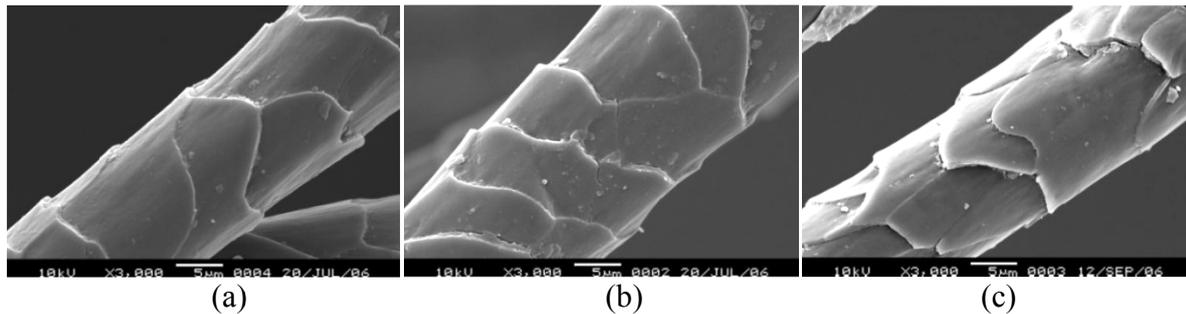


Figure 1- 55 : Images MEB des fibres de laine (a) non traitées; (b) traitées par plasma sous air/hélium pendant 3 min; (c) traitées par plasma sous oxygène/ hélium pendant 3 min [CAI, 2006a]

Ceria et al. [CERIRA, 2008] ont comparé les traitements d'un tissu de laine par deux types de plasma : un plasma à pression réduite sous dioxygène et l'autre à pression atmosphérique sous azote. Ils ont remarqué que l'augmentation de la rugosité de surface est plus importante dans le cas de plasma à pression réduite.

Xu et al. [XU, 2009] ont étudié l'impact d'un traitement par plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression atmosphérique sous hélium et un mélange oxygène/hélium sur la topographie de surface des tricots de laine conditionnés à différents taux d'humidité relative. Ils ont remarqué que le traitement des tricots ayant une humidité relative de 65 % n'a pas affecté les écailles de laine. Par contre, lorsque l'humidité relative est de 100 %, le traitement a éliminé la totalité des écailles et a entraîné une diminution de la rugosité de surface.

Wong et al. [WONG, 1999] ont traité un tissu de lin par un plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression réduite (15 Pa) utilisant l'argon et le dioxygène comme gaz plasmagènes. Dans les deux cas, ils ont remarqué que plus le temps de traitement est important, plus la rugosité sera forte. De même, ils ont remarqué que l'augmentation de la rugosité est plus importante si le gaz plasmagène utilisé est le dioxygène comparé au traitement réalisé sous argon.

Shinha [SHINHA, 2009] ont également observé une augmentation de la rugosité des fibres de jute lors d'un traitement par un plasma à pression réduite sous argon. Par conte, ils ont remarqué que les traitements de longue durée ont engendrés une dégradation des propriétés mécaniques des fibres. Les mêmes types de résultats ont été observés par Jimenez et al. [JIMENEZ, 2008], en traitant des fibres de chanvre, de lin et d'agave par un plasma à pression atmosphérique sous air.

1.6.2.2 Fibres artificielles

Vesel et al. [VESEL, 2010] ont traité des tissus de viscose par un plasma radiofréquence (27,12 MHz) à pression réduite sous différents types de gaz plasmagènes pendant 5 secondes. Ils ont remarqué, après traitement, une augmentation de la rugosité si le traitement est réalisé sous dioxygène ou bien hydrogène. Par contre, le traitement réalisé sous azote n'a pas entraîné des modifications à la surface de viscose (Figure 1-56).

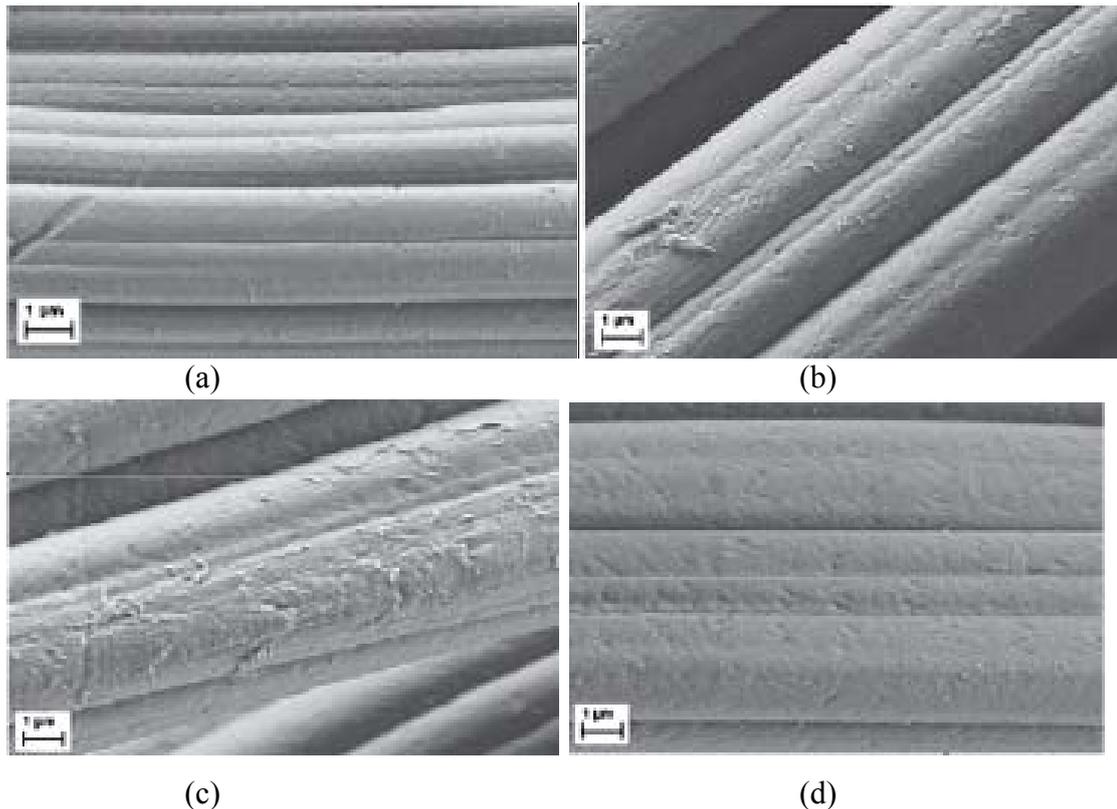


Figure 1- 56 : Images MEB des fibres de viscose (a) non traitées ; (b) traitées sous dioxygène ; (c) traitées sous hydrogène ; et (d) traitées sous azote [VESEL, 2010]

1.6.2.3 Fibres synthétiques

Wrobel et al. [WROBEL, 1978] ont montré que des traitements plasma à pression réduite sous azote, oxygène, air, dioxyde de carbone ou bien ammoniac permettent d'augmenter la rugosité de surface d'un tissu de poly(éthylène téréphtalate). De même, ils ont remarqué que plus la fréquence appliquée aux électrodes est faible, plus la taille des pores formés en surface sera grande (Figure 1-57).

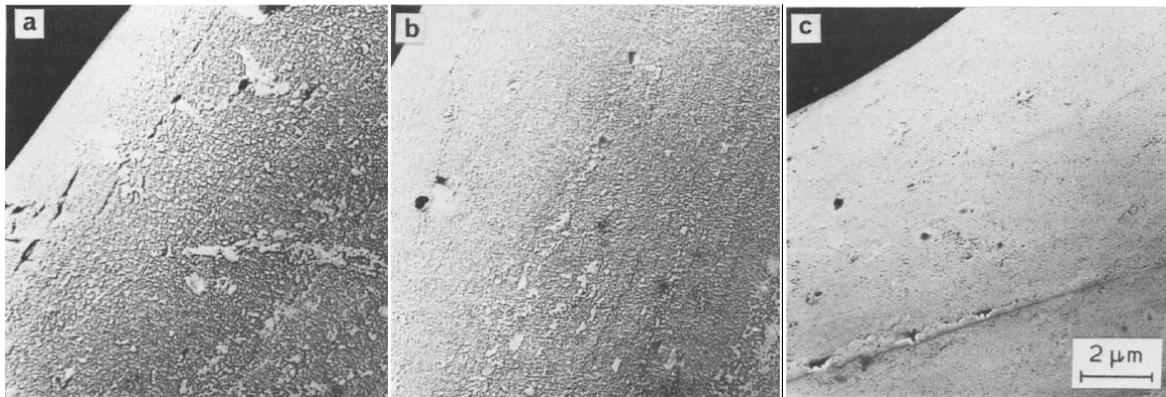


Figure 1- 57 : Images MEB des fibres de poly(éthylène téréphtalate) traitées par plasma sous azote à une fréquence de (a) 0,05 kHz ; (b) 5 kHz; et (c) 100 kHz, pendant 4 minutes [WROBEL, 1978]

Costa et al. [COSTA, 2006] ont également observé une augmentation de la rugosité, en traitant un tissu de polyester par un plasma atmosphérique sous des mélanges composés de différents types de gaz (oxygène, azote, méthane et hydrogène). En outre, ils ont constaté que l'intensité du traitement dépend de la composition du gaz plasmagène (Figure 1-58).

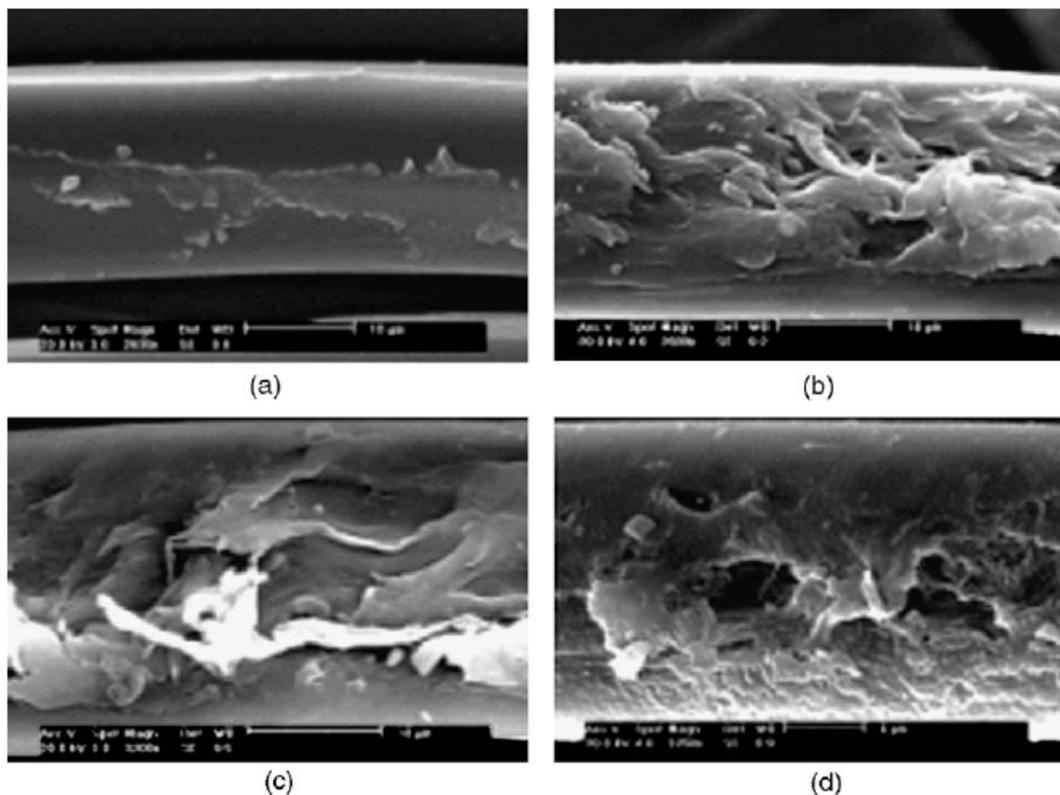
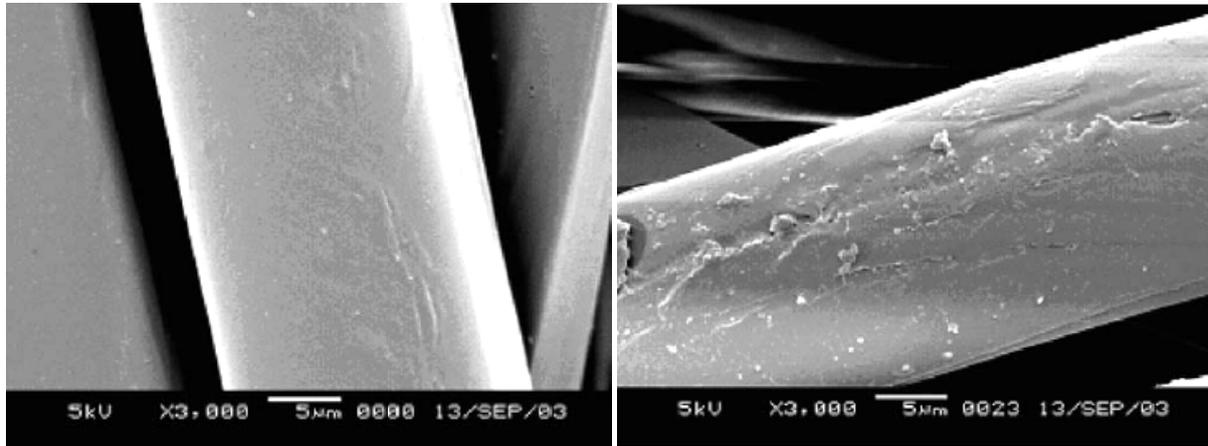


Figure 1- 58 : Images MEB des filaments de polyester (a) non traités ; (b) traités sous $O_{90}N_9H_1$; (c) traités sous N_2H_8 ; (d) traités sous $O_{10}N_{83}H_7$ [COSTA, 2006]

De même, Zhongfu et al. [ZHONGFU, 2007] ont démontré qu'un traitement par plasma de type décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique sous un mélange argon/dioxygène pendant 1 minute permet de modifier la topographie de surface de polyester (Figure 1-59).



(a)

(b)

Figure 1- 59 : Images MEB des fibres de polyester (a) non traitées et (b) traitées par plasma sous un mélange argon/dioxygène pendant 1 min [ZHONGFU, 2007]

Leroux et al. [LEROUX, 2006] ont aussi remarqué une légère augmentation de la rugosité d'un non-tissé en polyester de 17,6 à 43,4 nm lors d'un traitement par un plasma de type décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique sous air (Figure 1-60).

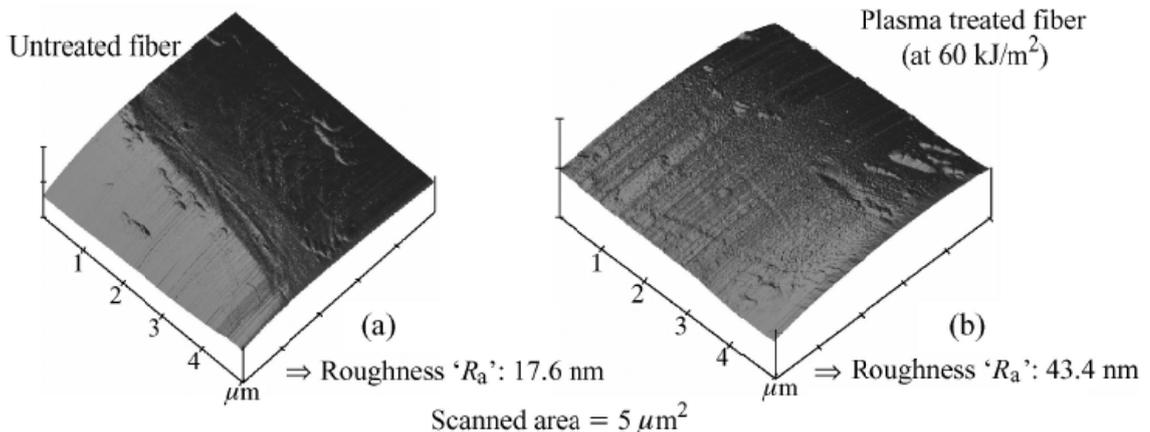


Figure 1- 60 : Images topographiques des fibres de polyester (a) avant traitement et (b) après traitement à une puissance de 60 kJ/m² [LEROUX, 2006]

Morent et al. [MORENT, 2007] ont comparé les traitements des non-tissés en poly(éthylène téréphtalate) et en polypropylène par un plasma de type décharges à barrière diélectrique à 5 kPa sous différents types de gaz plasmagènes. Ils ont remarqué une augmentation de la rugosité si le traitement est réalisé sous air à haute densité d'énergie. Par

contre, les traitements réalisés sous argon et hélium n'ont pas entraîné des modifications à la surface des non-tissés. En outre, ils ont constaté que les traitements n'ont pas engendré une dégradation des propriétés mécaniques des non-tissés.

Shin et al. [SHIN, 2008] ont démontré qu'un traitement par plasma atmosphérique sous un mélange hélium/ dioxygène permet d'augmenter la rugosité d'un non-tissé de PET de 50 g/m². En appliquant le même type de traitement sur un substrat composé de huit couches de tissu de polyester, Wang et al. [WANG, 2008a] ont aussi observé une augmentation de la rugosité de surface (Figure 1-61). Cette augmentation est plus importante pour les couches superficielles du substrat. Une analyse de la topographie de surface leur a montré que le nombre et la taille de micropores formés en surface diminuent graduellement en passant d'une couche à l'autre (Figure 1-62) [WANG, 2007a].

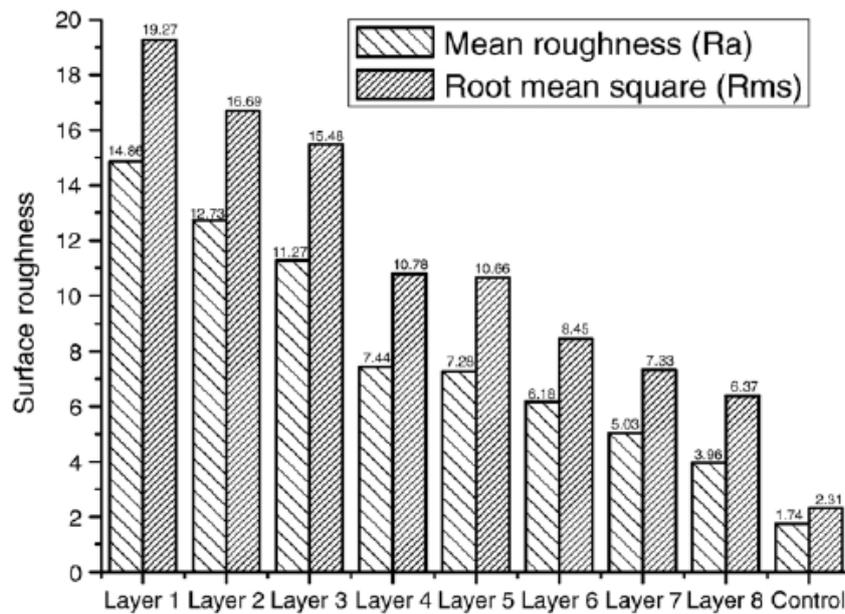


Figure 1- 61 : Rugosité de surface de différentes couches du substrat en PET [WANG, 2008a]

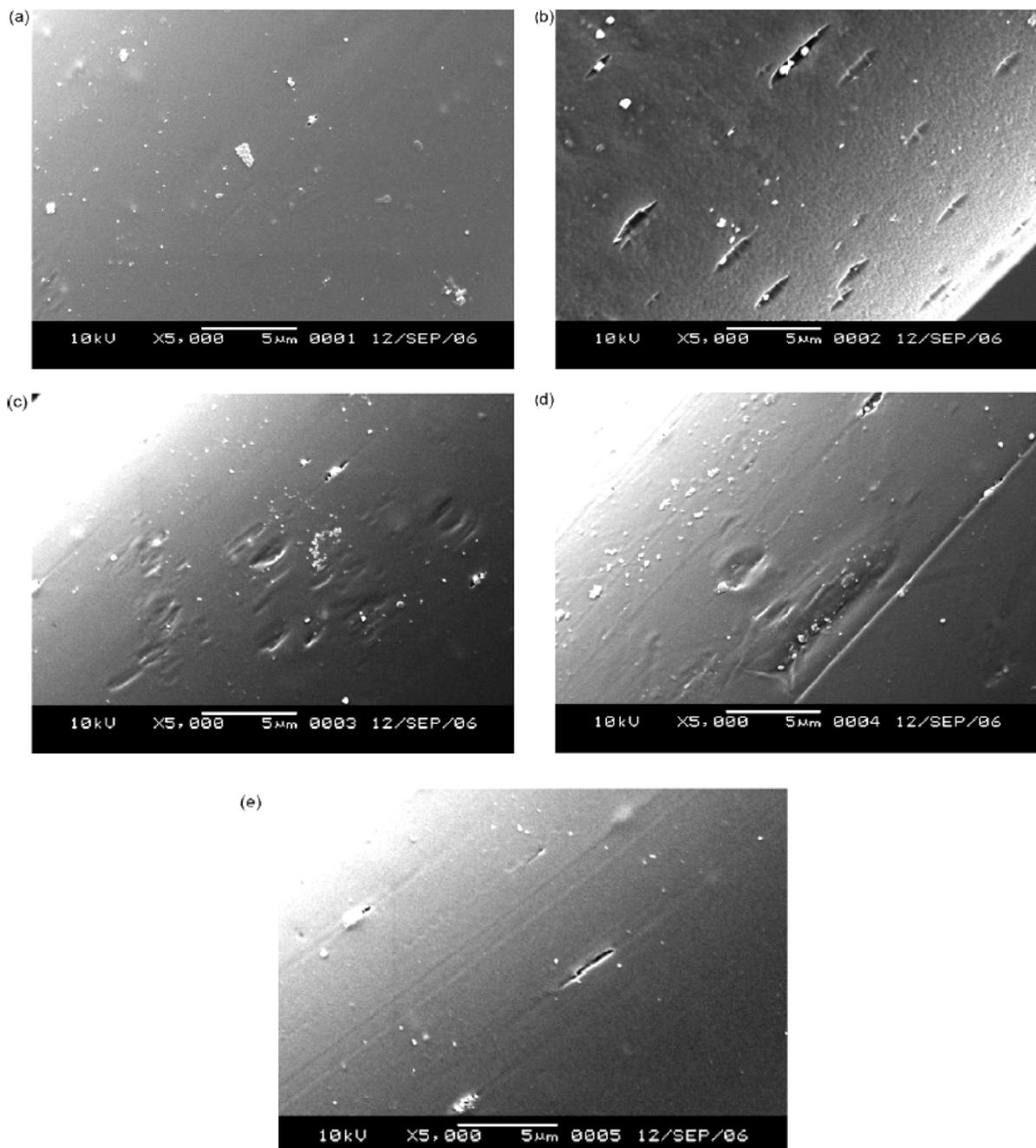


Figure 1- 62 : Images MEB de (a) tissu de PET non traité ; (b) couche 1 ; (c) couche 2 ; (d) couche 3 et (e) couche 4 de substrat de PET traité par un plasma sous hélium/dioxygène pendant 2 secondes [WANG, 2007a]

Samanta et al. [SAMANTA, 2009] ont comparé les traitements des tissus en polyester et en polyamide par un plasma atmosphérique utilisant l'hélium, l'argon, l'air et le dioxygène comme gaz plasmagènes. Ils ont remarqué, après traitement, que la modification de la topographie de surface est plus marquée pour le polyamide comparé au polyester. Ils attribuent cette différence à la cristallinité de deux matières.

McCord et al. [MCCORD, 2002] ont traité un tissu de polyamide et un non-tissé de polypropylène par un plasma atmosphérique de type décharges à barrière diélectrique utilisant l'hélium ou bien un mélange hélium/dioxygène comme gaz plasmagènes. Ils ont remarqué que l'augmentation de la rugosité est plus importante si le mélange hélium/dioxygène est utilisé. De même, ils ont remarqué que la modification de la topographie de surface est plus marquée pour le polypropylène. Hwang et al. [HWANG, 2005] ont également observé une augmentation de la rugosité d'un non-tissé de polypropylène lors d'un traitement par un plasma atmosphérique sous hélium. En outre, ils ont remarqué que plus le temps de traitement est important, plus la rugosité sera forte.

Yip et al. [YIP, 2002] ont étudié l'impact des traitements par un plasma à pression réduite sous dioxygène (O_2), argon (Ar_2) ou bien tétrafluorométhane (CF_4) sur un tissu de polyamide (nylon 6). Dans tous les cas, ils ont remarqué que plus le temps de traitement est important, plus la modification de la topographie de surface sera marquée. En outre, ils ont remarqué que le traitement réalisé sous dioxygène est plus efficace que celui réalisé sous argon.

Ferrante et al. [FERRANTE, 1999] ont traité des fibres de polyester par un plasma radiofréquence à pression réduite sous dioxygène ou bien un mélange dioxygène/tetrafluoroéthylène. Ils ont remarqué que l'augmentation de la rugosité est plus importante si le mélange dioxygène/tetrafluoroéthylène est utilisé comme gaz plasmagène. Wang et al. [WANG, 2008b] ont aussi observé une augmentation de la rugosité de surface des fibres de polyéthylène lors d'un traitement par un plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression atmosphérique sous hélium.

En résumé, les traitements plasma sont capables de modifier la structure physique des matériaux textiles. De telles modifications résultent du bombardement de la surface par les espèces énergétiques du plasma. Elles peuvent se traduire, sur le plan morphologique, par l'apparition de microfissures, de micro-cratères et de rainures à l'échelle nanométrique de la surface. L'intensité de traitement semble être influencée par de nombreux paramètres tels que la pression, la nature de gaz plasmagène, le temps de traitement, la puissance électrique, le débit de gaz, la fréquence appliquée aux électrodes, la nature chimique de substrat, la

structure du média à traiter et l'humidité. Ceci souligne l'importance d'optimiser ces paramètres de réglage afin de quantifier leur influence sur les résultats du traitement.

Comme nous avons déjà vu, les modifications morphologiques et chimiques induites en surface du substrat augmentent la mouillabilité du substrat traité, ce qui permet d'améliorer l'étalement des liquides sur la surface. En outre, ces modifications peuvent contribuer à l'amélioration de l'adhésion avec d'autres matériaux et monomères. Ce point fait l'objet de la section suivante.

1.6.3 Amélioration de l'adhésion

Comme nous avons vu dans les paragraphes précédents, les traitements plasma permettent d'augmenter l'énergie de surface et la rugosité des matériaux textiles. Ces deux critères sont parmi les critères nécessaires pour améliorer leurs propriétés d'adhérence. Ainsi, la technologie plasma constitue une bonne alternative pour améliorer l'adhésivité des matériaux et réduire l'énergie utilisée.

1.6.3.1 Fibres naturelles

Cai et al. [CAI, 2008b] ont traité un tricot de laine par un plasma atmosphérique pendant 3 minutes sous des mélanges air/hélium et dioxygène/hélium, puis, ils ont réalisé sur ce tricot une imprégnation dans un bain contenant 15 g/l de résine Synthappret BAP. Ils ont remarqué que l'amélioration de la stabilité dimensionnelle du tricot ainsi que la diminution du feutrage sont plus importantes si un traitement plasma est réalisé avant l'imprégnation. En effet, le feutrage de laine est passé de 53,3 à 5,64 % si le traitement est réalisé sous un mélange air/hélium et à 5,23 % si le mélange dioxygène/hélium est utilisé. Par contre, lorsque la résine est utilisée seule, le feutrage est passé uniquement de 53,3 à 17,5 %. Les mêmes types de résultat ont été observés par Kim et al. [KIM, 2002a] en réalisant une imprégnation de 2 minutes dans un bain contenant 2 % de silicone sur un tissu de laine, après l'avoir traité par un plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression réduite sous dioxygène pendant 60 secondes.

Garg et al. [GARG, 2007] ont traité un tissu de laine par un plasma atmosphérique sous différents types de gaz plasmagènes, puis, ils ont réalisé sur ce tissu une imprégnation dans

une solution contenant 0,045 mol/l de pyrrole. Ils ont remarqué une amélioration de l'adhésion de pyrrole sur les fibres de laine si un traitement plasma est réalisé avant imprégnation (Figure 1-63).

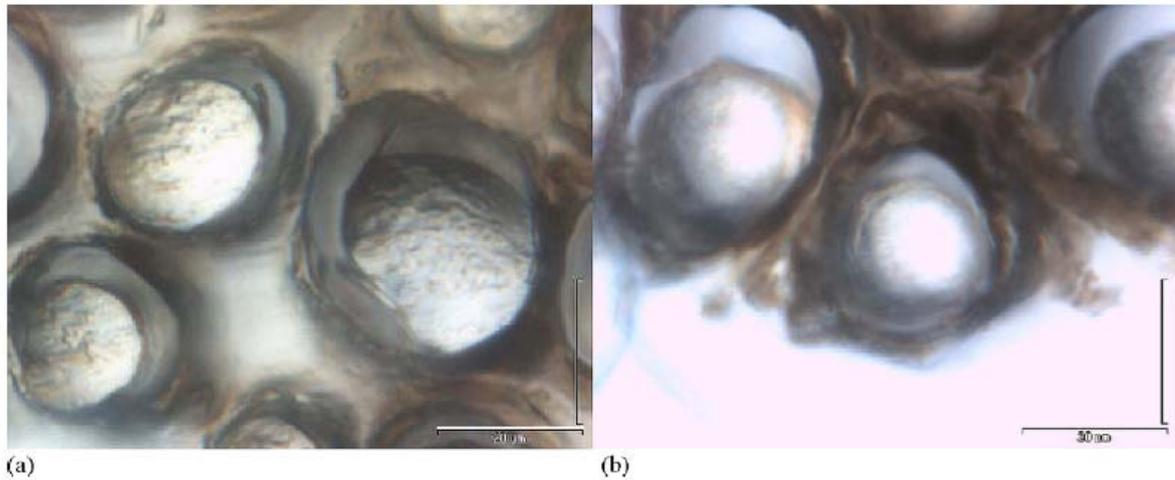


Figure 1- 63 : Coupe transversale des fibres de laine imprégnées avec une solution de pyrrole (a) avec traitement plasma et (b) sans traitement plasma [GARG, 2007]

Jimenez et al. [JIMENEZ, 2008] ont également montré que les traitements par un plasma à pression atmosphérique sous air permettent d'augmenter l'adhésion entre une matrice en acétate-butyraté de cellulose (CAB) et des fibres de chanvre, de lin ou d'agave.

1.6.3.2 Fibres artificielles

Zemljic et al. [ZEMLJIC, 2009] ont traité un substrat en fibres de viscose par un plasma radiofréquence à pression réduite (27,12 MHz) sous dioxygène pendant 30 secondes. Puis, ils ont réalisé sur ce substrat une imprégnation de 24 heures dans deux bains contenant respectivement 0,5 et 1 % de Chitosan. Ils ont remarqué que le taux d'absorption de Chitosan par la viscose est augmenté de 11,2 % dans le premier cas et de 23,3 % dans le second. Ils ont conclu que les traitements sous plasma permettent de conférer aux surfaces des textiles des propriétés antibactériennes.

1.6.3.3 Fibres synthétiques

Leroux et al. [LEROUX, 2006], [LEROUX, 2006] ont observé une augmentation de la force d'adhésion entre une résine siliconée avec primaire d'adhésion et le poly(éthylène téréphtalate) après un traitement par plasma atmosphérique sous air. En effet, ils ont remarqué

que la force d'adhésion de tissu est augmentée de 100 % après un traitement plasma à une puissance de traitement (TP) de 60 kJ/m² (Figure 1-64). De même, ils ont remarqué que la force de rupture des non-tissés de 30 g/m² est augmentée de 280 % après un traitement plasma à une TP de 120 kJ/m² (Figure 1-65). En outre, ils ont constaté que contrairement au tissu, l'augmentation de la force d'adhésion du non-tissé ne se fait pas brusquement mais progressivement avec l'augmentation de la puissance de traitement. Ils ont expliqué ceci par le fait que la structure plus ouverte du non-tissé permet au plasma de traiter d'une manière plus aisée toute la surface accessible par le silicone et ainsi d'augmenter la force d'adhésion à des faibles TP.

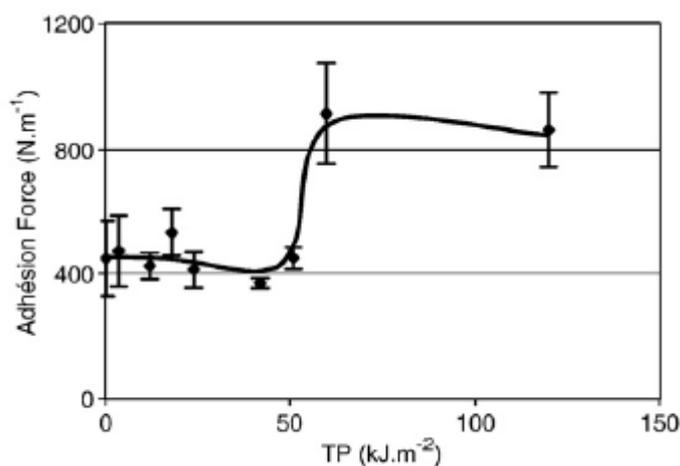


Figure 1- 64 : Force d'adhésion entre la résine siliconée avec primaire d'adhésion et le tissu de poly(éthylène téréphtalate) mesurée grâce à des tests de pelage à 180° [LEROUX, 2006]

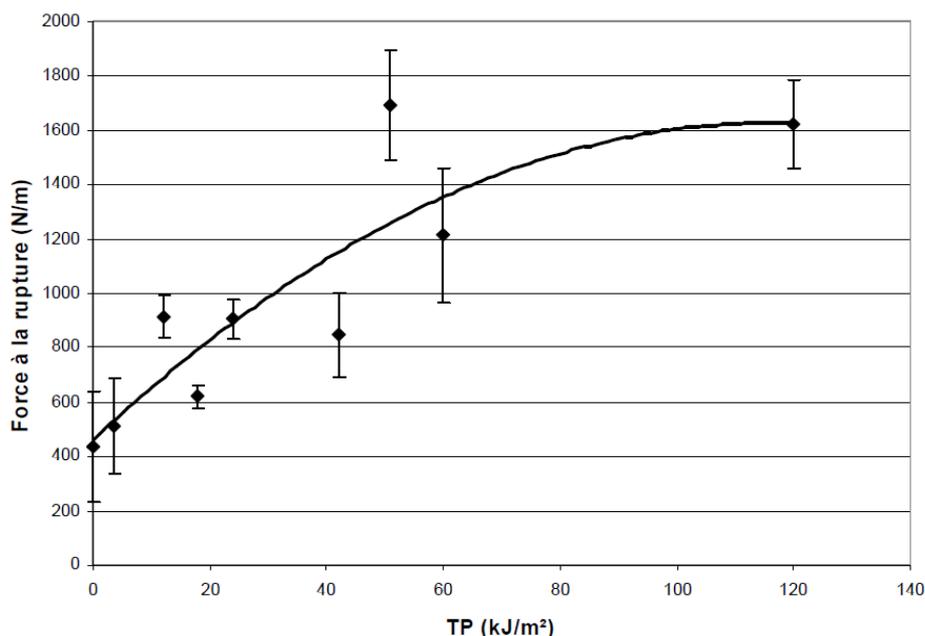


Figure 1- 65 : Evolution de la force de rupture des non-tissés 30 g/m² imprégnés par le silicone avec primaire d'adhésion en fonction de la puissance de traitement (TP) [LEROUX, 2007]

Wang et al. [WANG, 2008b] ont montré que le traitement par un plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression atmosphérique sous hélium permet d'améliorer l'adhésion d'époxyde sur les fibres de polyéthylène. De même, ils ont remarqué que la résistance apparente au cisaillement (IFSS ou Interfacial Shear Strength) de la liaison fibre de polyéthylène/résine époxyde dépend de la puissance électrique et de la température de traitement (Figure 1-66).

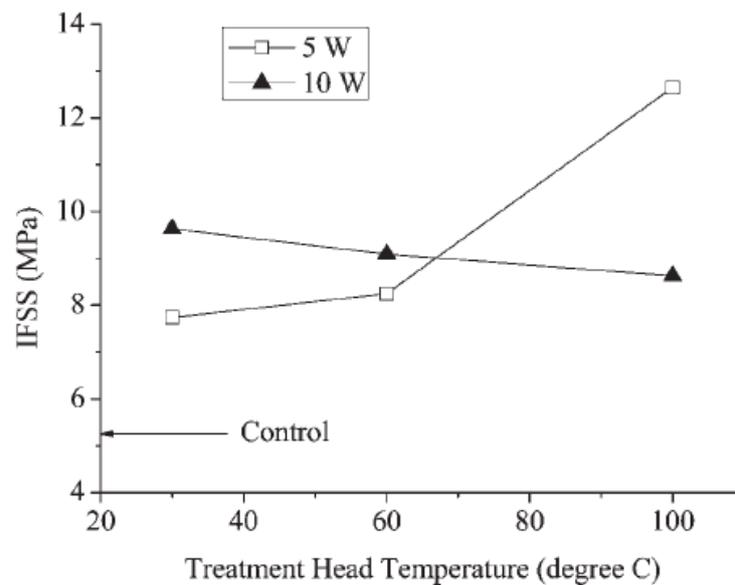


Figure 1- 66 : Evolution de la résistance apparente au cisaillement (IFSS) de la liaison fibre de polyéthylène/résine époxyde en fonction de la température et de la puissance de traitement [WANG, 2008b]

Rahel et al. [RAHEL, 2000] ont également observé une augmentation de la force d'adhésion entre des monofilaments de polyester et une matrice de résine époxyde de 4,2 à 33,8 kN/m, après un traitement par plasma atmosphérique sous azote.

Garg et al. [GARG, 2007] ont traité un tissu de polyester par un plasma atmosphérique utilisant l'hélium ainsi que des mélanges hélium/acétylène et hélium/azote comme gaz plasmagènes. Puis, ils ont réalisé sur ce tissu une imprégnation dans une solution contenant 0,045 mol/l de pyrrole. Ils ont remarqué que l'imprégnation de la surface du tissu est plus uniforme si le traitement est réalisé sous le mélange hélium/azote (Figure 1-67).

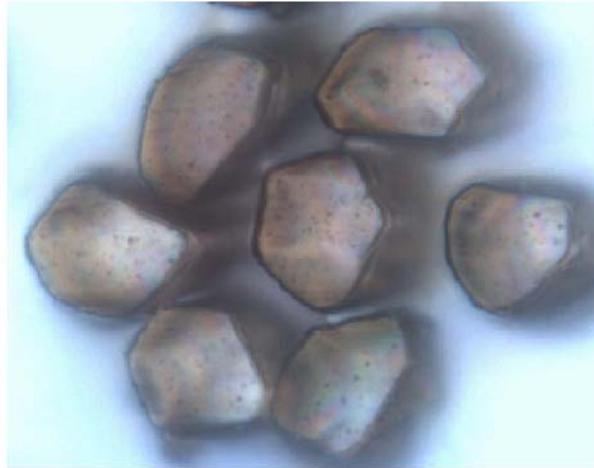


Figure 1- 67 : Vue transversale des fibres de polyester traitées par plasma et imprégnées avec une solution de pyrrole [GARG, 2007]

Les mêmes types de résultats ont été observés par Cernakova et al. [CERNAKOVA, 2007], en réalisant une imprégnation de 10 secondes dans un bain contenant 1 g d'oxyde ferrique (Fe_2O_3) sur un non-tissé de polypropylène après l'avoir traité par un plasma atmosphérique sous air pendant 5 secondes. Ils ont remarqué que le traitement plasma permet d'augmenter l'adhésion de Fe_2O_3 sur le polypropylène (Figure 1-68) et d'améliorer sa stabilité après lavage (Figure 1-69).

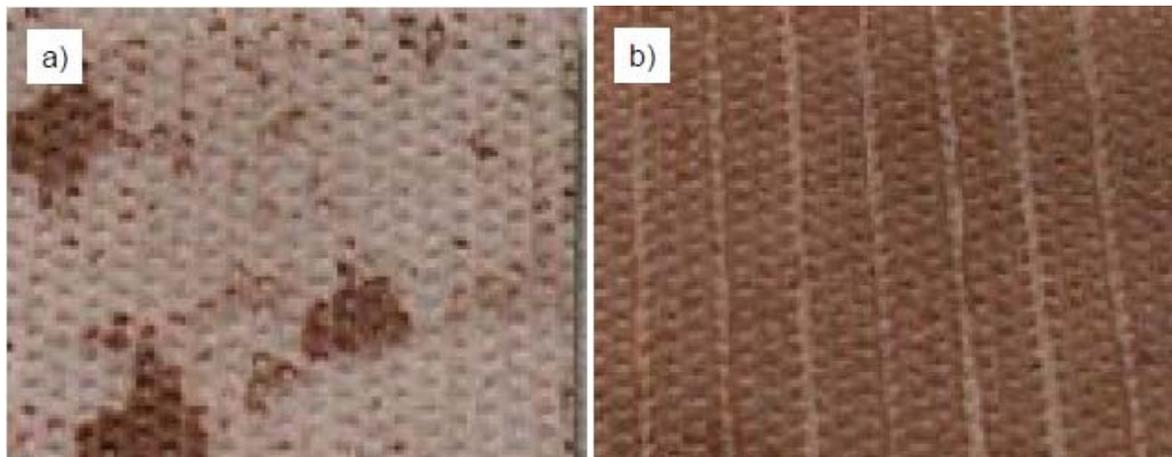


Figure 1- 68 : Images des non-tissés de polypropylène imprégnés avec une solution de Fe_2O_3 (a) sans traitement plasma et (b) avec traitement plasma sous air [CERNAKOVA, 2007]

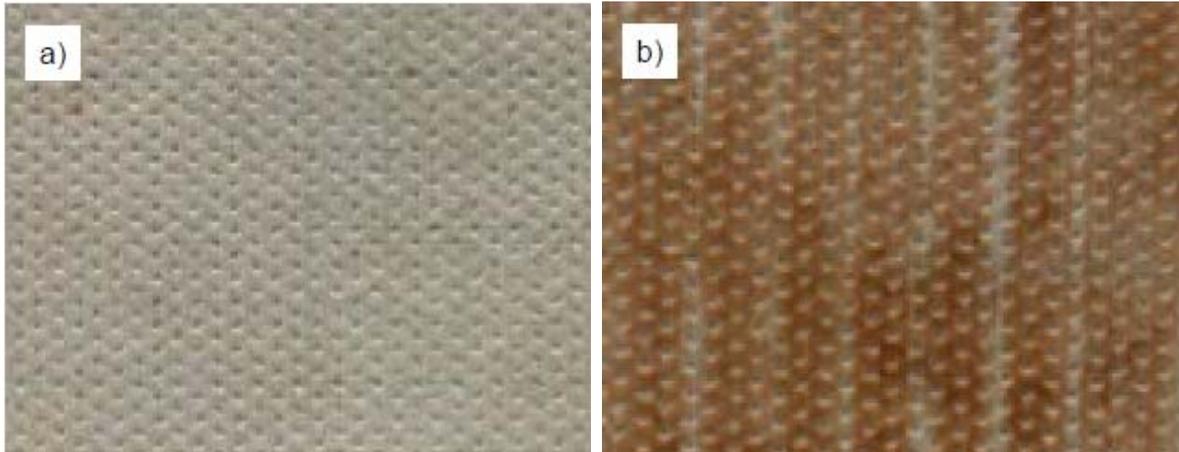


Figure 1- 69 : Images des non-tissés de polypropylène imprégnés avec une solution de Fe_2O_3 et lavés (a) sans traitement plasma et (b) avec traitement plasma sous air [CERNAKOVA, 2007]

Liu et al. [LIU, 2006] ont montré que le traitement par un plasma à pression réduite sous hélium pendant 3 secondes permet d'augmenter la force d'adhésion entre les fibres d'aramide et une résine époxyde. En outre, ils ont remarqué que plus le taux de reprise d'humidité des fibres est important, plus la résistance apparente au cisaillement de la liaison fibre d'aramide/résine époxyde sera grande.

Ainsi, les traitements plasma sont capables d'améliorer l'adhésion de matériaux textiles. Les résultats de traitement semblent aussi être influencés par de nombreux paramètres tels que la nature de gaz plasmagène, le temps de traitement, la puissance électrique, la structure du substrat et l'humidité.

Par ailleurs, le plasma peut être utilisé dans le nettoyage des surfaces textiles. Ceci fait l'objet de la section suivante, où nous allons présenter quelques exemples de recherche afin de donner une idée sur ce type de traitement.

1.6.4 Nettoyage des surfaces

Les traitements plasma permettent de nettoyer les surfaces textiles de leurs contaminants. En fait, elles peuvent réagir sur les impuretés en surface et les transformer en composés volatils.

1.6.4.1 Fibres naturelles

Cai et al. [CAI, 2003a] ont étudié l'impact des traitements plasma à pression atmosphérique sur l'élimination d'une couche d'encollage en poly(vinyl alcool) (PVA) de la surface d'un tissu de coton. Après traitement, ils ont remarqué que le mélange air/dioxygène/hélium est plus efficace que le mélange air/hélium si le traitement plasma est suivi uniquement d'un lavage à l'eau froide. Par contre, si le traitement plasma est suivi d'un lavage à l'eau chaude, presque la totalité de PVA est éliminée de la surface du tissu de coton dans les deux cas. Dans une autre publication [CAI, 2006b], les auteurs ont remarqué que plus le temps de traitement plasma est important, plus le taux de PVA éliminé par un lavage à l'eau froide consécutif au traitement plasma sera grand (Figure 1-70). Par exemple, le taux de PVA éliminé a atteint à peu près 94 % suite à un traitement plasma de 8 minutes suivi d'un lavage à l'eau froide. Les mêmes types de résultats ont été observés si l'hélium est utilisé comme gaz plasmagène [CAI, 2008a]. Au final, les auteurs ont conclu que les traitements par plasma permettent d'améliorer les procédés de lavage des tissus de coton. En effet, même avec des lavages à chaud dans une solution d'eau oxygéné l'élimination de PVA n'atteint que 93 %.

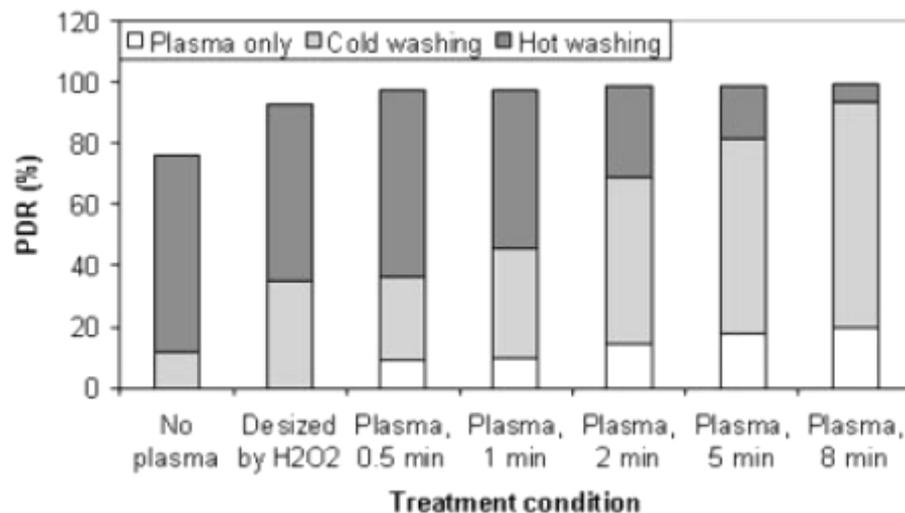


Figure 1- 70 : Taux d'élimination du PVA (PDR) d'un tissu de coton suivant le traitement [CAI, 2006b]

Sun et al. [SUN, 2004] ont montré que le traitement des tissus de coton et de laine par un plasma radiofréquence (13,56 MHz) à pression réduite sous dioxygène permet d'améliorer et de simplifier les procédés classiques de désensimage. Ils ont remarqué après traitement plasma une réduction du temps de désensimage de 50 % pour le coton et la laine.

Kulyk et al. [KULYK, 2008] ont traité un tricot de laine contenant des impuretés en surface par un plasma de type décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique utilisant l'air comme gaz plasmagène. Ils ont remarqué, après traitement, que les impuretés ont été éliminées de la surface des fibres de laine (Figure 1-71).

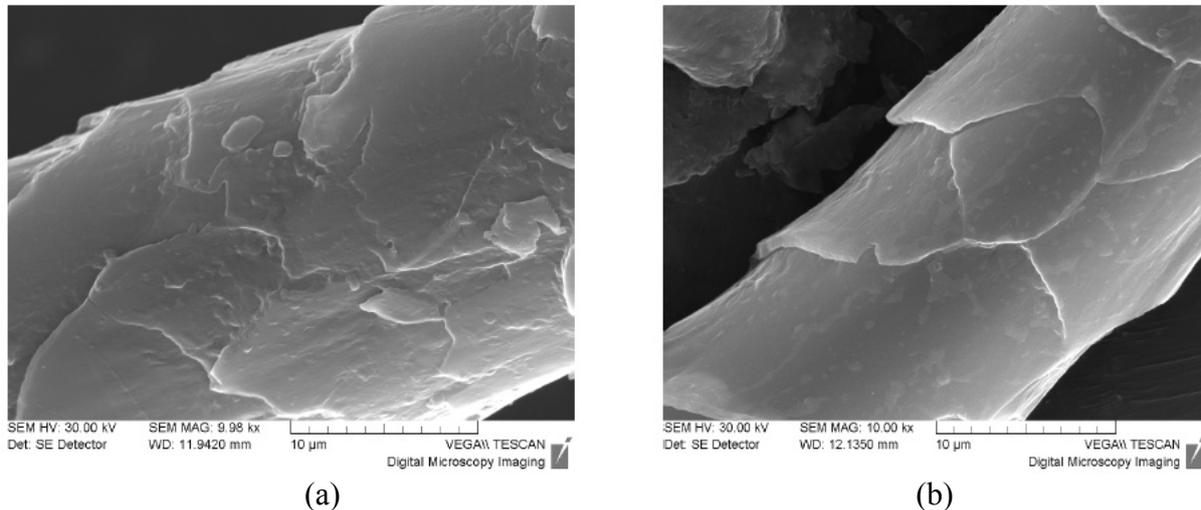


Figure 1- 71 : Images MEB des fibres de laine (a) non traitées et (b) traitées par plasma sous air [KULYK, 2008]

1.6.4.2 Fibres artificielles

Cai et al. [CAI, 2003b] ont étudié l'effet des traitements plasma à pression atmosphérique sur l'élimination d'une couche d'encollage en poly(vinyl alcool) (PVA) de la surface d'un tissu en viscose. Ils ont remarqué que des traitements de lavage avec l'eau chaude et froide consécutives au traitement plasma ont permis d'éliminer jusqu'à 97,04 % de PVA si le traitement plasma est réalisé sous le mélange air/dioxygène/hélium et jusqu'à 94,05 % si le mélange air/hélium est utilisé. En revanche, le procédé classique de lavage n'a permis d'éliminer que 68,64 % de PVA (Figure 1-72). De même, ils ont remarqué que plus le temps de traitement plasma est important, plus la surface des fibres de viscose sera propre (figure 1-73). Au final, ils ont conclu que les traitements plasma permettent une élimination plus simple lors des méthodes classique de désencollage.

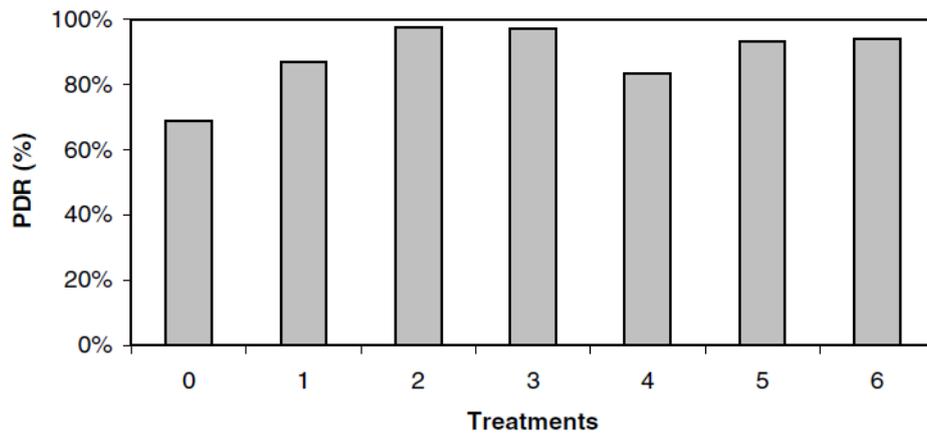


Figure 1- 72 : Taux d'élimination du PVA (PDR) d'un tissu de viscose suivant le traitement : 0- lavage ; 1- traitement plasma sous air/O₂/He pendant 30 s + lavage ; 2- traitement plasma sous air/O₂/He pendant 2 min + Lavage ; 3- traitement plasma sous air/O₂/He pendant 5 min + lavage ; 5- traitement plasma sous air/He pendant 2 min + lavage ; 6- traitement plasma sous air/He pendant 5 min + lavage [CAI, 2003b]

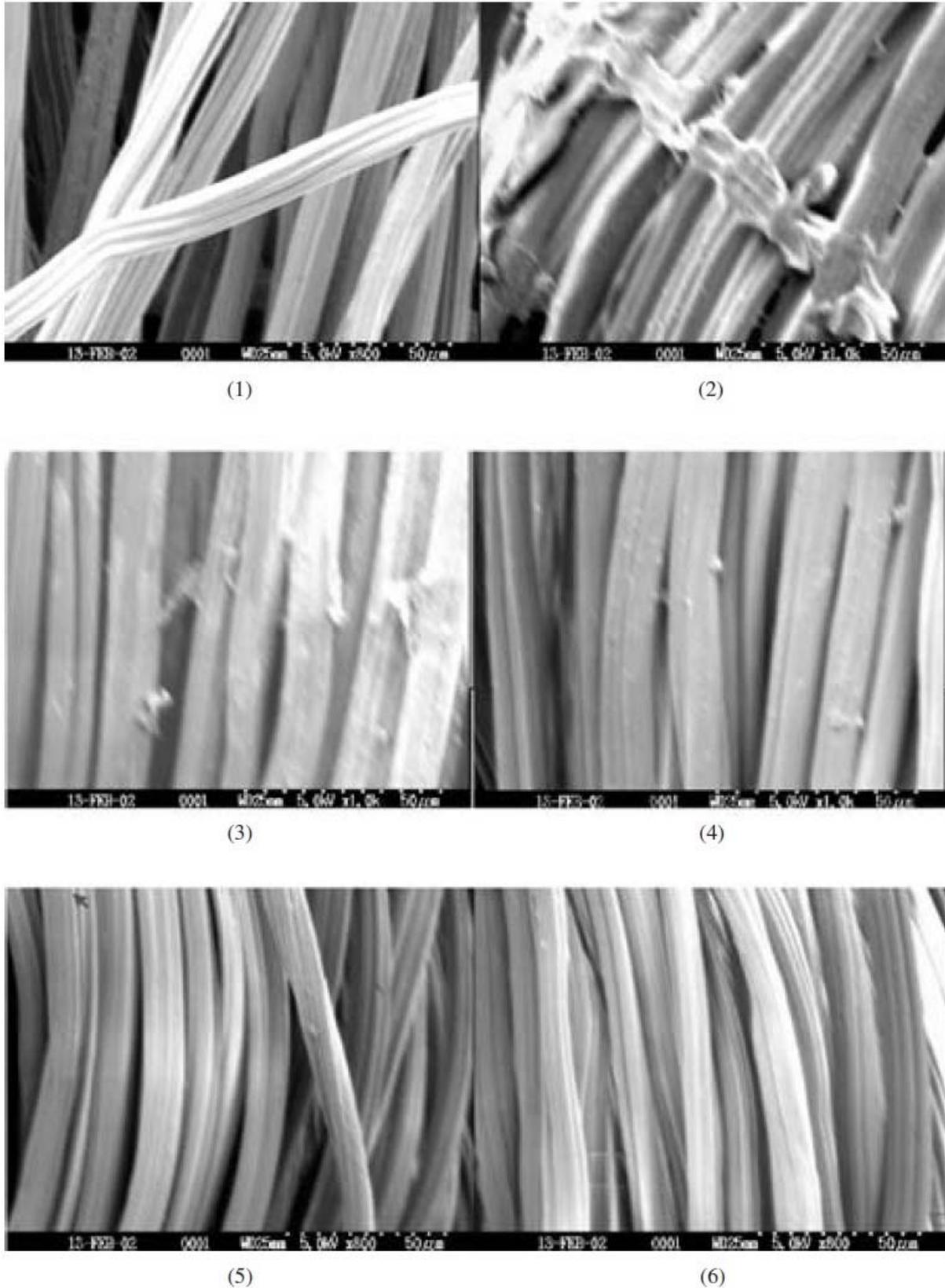


Figure 1- 73 : Images MEB des fibres de viscose (1) non traitées ; (2) après encollage ; (3) après encollage + lavage ; (4) après encollage + traitement plasma sous air/O₂/He pendant 30 s + lavage ; (5) après encollage + traitement plasma sous air/O₂/He pendant 2 min + lavage ; (6) après encollage + traitement plasma sous air/O₂/He pendant 5 min + lavage [CAI, 2003b]

1.6.4.3 Fibres synthétiques

Bae et al. [Bae, 2006] ont étudié l'impact d'un traitement par un plasma à pression réduite sous dioxygène et azote sur l'élimination d'une couche d'encollage en poly(vinyl alcool) (PVA) de la surface d'un tissu de polyester. Ils ont remarqué que le traitement réalisé sous dioxygène est plus efficace que celui réalisé sous azote. De même, ils ont constaté que plus le temps de traitement est important, plus la surface des fibres de PET sera propre (Figure 1-74).

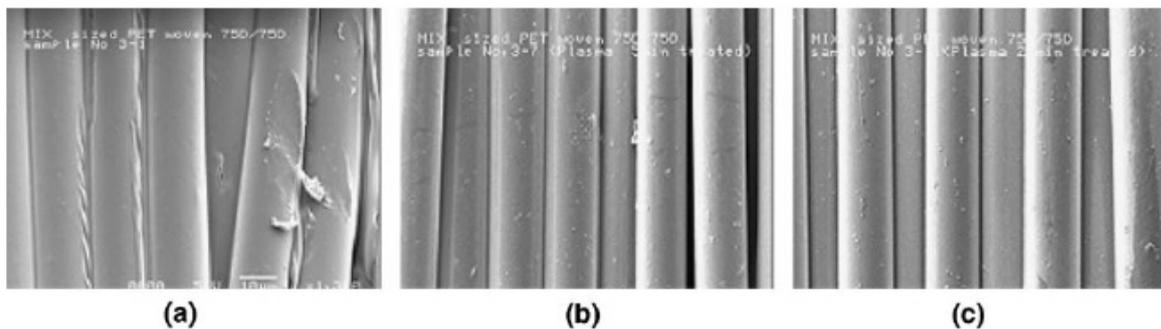


Figure 1- 74 : Images MEB des fibres de PET (a) avant traitement plasma ; (b) après traitement plasma sous O₂ pendant 5 minutes ; (c) après traitement plasma sous O₂ pendant 20 minutes [BAE, 2006]

En résumé, les traitements par plasma permettent de conférer à la surface textile des propriétés hydrophiles, hydrophobes, d'améliorer l'adhésion avec des monomères et d'éliminer les contaminants présents en surface. Les effets engendrés par les traitements semblent être influencés par de nombreux paramètres tels que la pression, la nature et la composition chimique du gaz plasmagène, le débit du gaz, le temps de traitement, la puissance électrique, la fréquence appliquée aux électrodes, la nature chimique du substrat, la finesse des fibres, la porosité du substrat, la densité de la matière, la structure du média à traiter, l'humidité et la propreté de la surface. Cette liste est évidemment non exhaustive. L'étude de l'influence de ces paramètres de réglage constitue donc la clé pour une meilleure compréhension des interactions plasma- surface.

1.7 Conclusion

En conclusion, les plasmas sont des milieux très actifs chimiquement. Ils peuvent être obtenus par différentes techniques et en particulier par les décharges électriques. Ces techniques connaissent aujourd'hui un fort regain d'intérêt dans le secteur textile vu qu'ils offrent un traitement de surface économiquement et écologiquement avantageux. En fait, les

traitements par plasma sont des traitements non polluants qui permettent de modifier la surface sans altérations des caractéristiques au cœur du matériau. De même, ils peuvent être intégrés dans une ligne de production. Leurs principales applications sont l'activation, le nettoyage, la gravure et le revêtement des surfaces.

En général, le traitement de surface par décharge électrique à pression atmosphérique modifie les propriétés de surface des matériaux traités par interaction entre les espèces excitées du plasma et la chaîne du polymère. Cependant, les processus mis en jeu sont très complexes et, de lors, les mécanismes de réactions sont largement inconnus.

Dans ce cadre, la littérature scientifique a étudié l'impact des traitements par plasma sur des matériaux textiles. Elle a mis en évidence de nombreux effets, mais en ordre dispersé. Jusqu'à présent il n'y a pas eu une étude systématique concernant les effets des paramètres opératoires sur les résultats des traitements. De ce fait, notre étude vise à mettre en évidence l'influence des divers paramètres expérimentaux sur les modifications engendrées par le traitement. Nous allons désormais nous intéresser plus particulièrement aux paramètres influant sur le procédé d'hydrophilisation de textiles tissés par décharge à barrière diélectrique à la pression atmosphérique sous air. Pour optimiser ce procédé, nous avons fait varier la nature chimique du substrat, la finesse des fibres, la densité de la matière, la porosité du substrat, la construction de l'armure, la vitesse de traitement et la puissance électrique. De même, nous allons mener une étude de sélection afin de déterminer les paramètres les plus pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma. Cette étape va permettre d'une part d'apporter de la connaissance sur le procédé à partir de l'analyse de données expérimentales, et d'autre part de simplifier la modélisation de ce procédé.

Dans cette optique, l'exploitation des techniques de l'intelligence artificielle, telles que la logique floue et les réseaux de neurones semble être prometteuse. Ces méthodes se caractérisent en effet par leur flexibilité et souplesse de calcul : elles peuvent traiter des données incertaines, imprécises et sont capables de tenir compte de l'expertise humaine. Les principes de ces techniques seront détaillés dans le chapitre suivant afin de s'initier à cette nouvelle discipline et mieux l'exploiter dans notre travail.

Chapitre 2 : Outils et méthodes de calcul utilisés

Les techniques de l'intelligence artificielle telles que la logique floue et les réseaux de neurones connaissent depuis quelques années un succès croissant dans divers domaines des sciences de l'ingénieur. Ces nouvelles techniques constituent en effet des puissants outils de modélisation du fait de leur forte non linéarité, souplesse et flexibilité de calcul. On conçoit leur intérêt dans la régulation et l'asservissement des processus industriels complexes, pour lesquels les informations sont souvent imprécises, incertaines, voire seulement qualitatives, ou contenues dans des boucles de régulation parfois incomplètes.

Dans ce chapitre, nous rappellerons tout d'abord les notions de base de la logique floue. Ensuite, nous rappellerons les concepts généraux des réseaux de neurones et nous décrirons les principaux types d'architecture de ces réseaux. Nous détacherons plus particulièrement à détailler les propriétés fondamentales des réseaux de neurones non bouclés utilisés dans notre thèse. Enfin, nous aborderons des généralités sur les méthodes de sélection de variables et nous présenterons la méthode que nous allons utiliser dans notre étude. La logique floue est utilisée dans cette méthode afin d'obtenir des résultats plus significatifs. Nous proposerons

également un algorithme pour identifier les paramètres les plus pertinents et éliminer les paramètres moins pertinents ou redondants. Cette étude va permettre d'une part d'extraire de la connaissance sur le procédé plasma, et d'autre part de réduire la complexité de la modélisation de ce procédé. Ce dernier point fait l'objet de chapitre 5 dans lequel les réseaux de neurones seront utilisés pour construire des modèles de prédiction des propriétés spécifiques recherchées.

2.1 La logique floue

La logique floue peut être vue comme étant une partie des techniques dédiées à l'intelligence artificielle en général. Cette méthode cherche à représenter mathématiquement l'ambiguïté, l'incertitude du langage et du raisonnement humain : c'est une méthodologie de contrôle qui simule des pensées humaines par l'intégration des imprécisions propres à chaque système physique. Elle permet donc la standardisation de la description d'un système et du traitement de données aussi bien numériques qu'exprimées symboliquement par des qualifications linguistiques. Les bases de cette théorie ont été formulées en 1965 par Lotfi A. Zadeh [ZADEH, 1965], et utilisées depuis 1975 dans les systèmes de régulation.

Actuellement, la logique floue est utilisée dans des nombreux domaines tels que la reconnaissance de formes, la modélisation des systèmes complexes, le traitement d'images et l'aide à la décision. Cette technique permet en effet de traiter des informations imprécises, incertaines ou incomplètes. De même, elle est capable de fournir des solutions rapides, robustes et interprétables.

2.1.1 Théorie des ensembles flous

Dans la théorie des ensembles classiques, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. Cela veut dire que les frontières des ensembles sont bien définies. Toutefois, dans la réalité, il est rare de rencontrer des choses dont le statut est précisément défini. Par exemple, où est exactement la différence entre une personne grande et une autre de grandeur moyenne?

La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle. Les frontières des ensembles flous peuvent être plus ambiguës et imprécises. En traitant par exemple la classe des personnes âgées comme un sous-ensemble flou, on permet aux gens de devenir âgés graduellement, comme dans la vraie vie.

2.1.1.1 Fonctions d'appartenances

Un ensemble flou A est défini sur un univers de référence X par sa fonction d'appartenance μ_A qui associe à chaque élément $x \in X$ une valeur $\mu_A(x)$ dans l'intervalle $[0,1]$. Si $\mu_A(x)$ vaut 1, alors l'élément x appartient tout à fait à A ; si cela vaut 0, x n'appartient pas du tout à A ; dans les cas intermédiaires, plus $\mu_A(x)$ est proche de 1, plus x appartient à A .

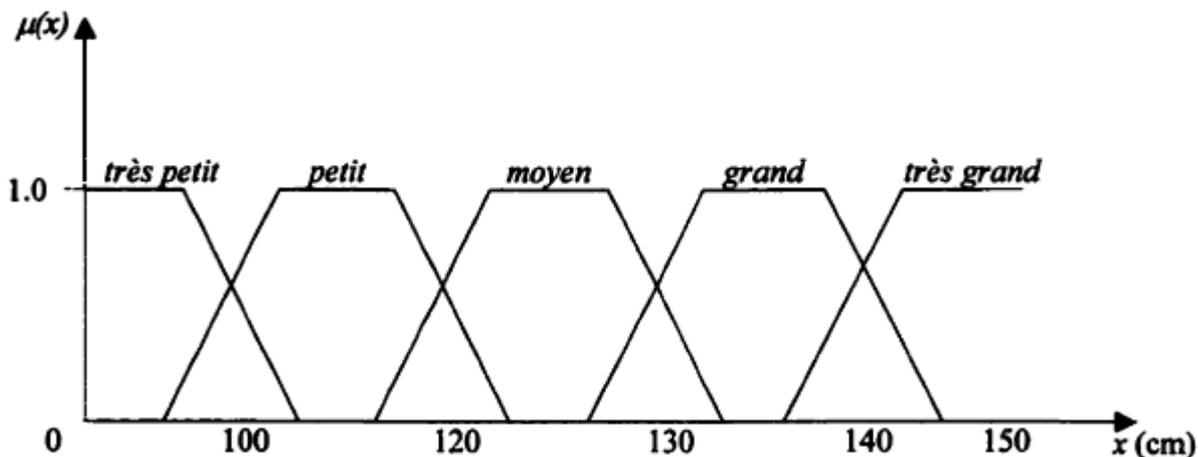
Ainsi, un ensemble flou discret ou continu est caractérisé de façon graphique par une fonction d'appartenance appliquée sur le domaine d'une variable numérique. De cette manière, les ensembles flous sont capables de donner une représentation à des valeurs subjectives [NETO, 1989].

En général, on utilise plusieurs formes pour la description de la fonction d'appartenance et le choix d'une forme dépend du domaine d'application et du degré admissible de perte d'information. Les formes les plus souvent employées sont de type triangulaire et trapézoïdale [CAO, 1997], [BERRIAH, 2000].

2.1.1.2 Variables linguistiques

Le concept de variable linguistique est fondamental pour les applications de la logique floue dans la commande de procédé. Elle diffère des variables numériques en prenant comme valeurs des mots ou des phrases dans un langage naturel ou artificiel. Par exemple, les valeurs de la variable linguistique *Taille* pour décrire la taille d'une certaine population peuvent être : *Très petit, petit, moyen, grand et très grand*.

Généralement, une variable linguistique est décrite par le triplet $(x, X, T(x))$, dans lequel x est une variable définie sur un ensemble de référence X [KOEHL, 1998]. L'ensemble $T(x)$ contient des sous-ensembles flous de X , utilisables pour caractériser x . Pour l'exemple des tailles d'une population donnée, on aura $x = \textit{Taille}$ définie dans l'ensemble de référence $X = [0,150]$ et $T(\textit{taille}) = \{\textit{très petit, petit, moyen, grand et très grand}\}$ (Figure 2-1).

Figure 2- 1 : Variable linguistique *Taille* [CAO, 1997]

Les valeurs de la variable floue sont donc des étiquettes floues exprimées en termes de fonctions d'appartenance [SINZINKAYO, 2000]. L'univers de discours d'une variable couvrira l'ensemble des valeurs prises par cette variable. En pratique, l'intersection entre deux prédicats consécutifs est non nulle, de façon à pouvoir exercer une pondération sur la commande. Il en résulte un chevauchement des variables qui doit être suffisant pour permettre une description continue des variables mais pas trop important pour limiter l'imprécision. Il est notamment préférable d'éviter que les fonctions d'appartenance de deux prédicats voisins soient simultanément égales à 1 [SCHULY, 2002].

2.1.1.3 Opérateurs logiques flous

Les principales opérations de la théorie des ensembles flous sont l'intersection, l'union et la complémentarité. Ces opérateurs sont essentiellement des généralisations des opérations entre les ensembles classiques.

a) L'intersection- ET

L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensembles est le *ET*. Le degré de vérité de la proposition « *A ET B* » est le minimum des degrés de vérité de *A* et de *B* :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2-1)$$

b) L'union- OU

L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensembles est le *OU*. Le degré de vérité de la proposition « *A OU B* » est le maximum des degrés de vérité de *A* et de *B* :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2-2)$$

c) La complémentarité- NON

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est le *NON*:

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad (2-3)$$

Cette définition ne permet pas de préserver toutes les propriétés des sous-ensembles classiques et, en général, on a :

$$A \cap \bar{A} \neq \emptyset \quad (2-4)$$

$$A \cup \bar{A} \neq X \quad (2-5)$$

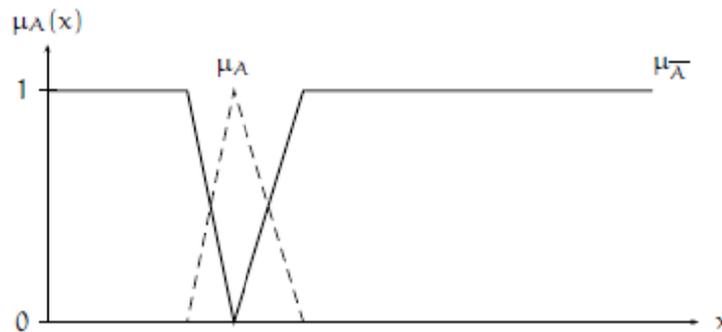


Figure 2- 2: Fonction d'appartenance du complément d'un sous-ensemble flou

2.1.1.4 Règles floues

En général, plusieurs valeurs de variables linguistiques, convenablement définies par des fonctions d'appartenance, sont liées entre elles par des règles, afin de tirer des conclusions. De ce fait, pour la description du processus de raisonnement et d'évaluation d'une variable floue en vue de tirer une conclusion et réaliser une action, un ensemble de règles est donné.

Une règle floue générale peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\text{Si } X_1 \text{ est } A_1 \text{ ET } X_2 \text{ est } A_2 \dots \text{ ET } X_n \text{ est } A_n, \text{ ALORS } Y \text{ est } B.$$

Dans cette règle, la combinaison des propositions « X_1 est A_1 », ..., « X_n est A_n » constitue la prémisse de la règle tandis que « Y est B » forme sa conclusion. X_1, \dots, X_n sont des variables floues d'entrée. Y est la variable de sortie correspondante. A_1, \dots, A_n et B sont des valeurs floues correspondantes. Un exemple de règle floue est donné ci-dessous :

$$\text{SI « vitesse est grande » ET « obstacle est proche », ALORS « freinage est fort ».}$$

Dans cet exemple, les propositions « *vitesse est grande* » et « *obstacle est proche* » sont combinées par l'opérateur ET pour former la prémisse de la règle. « *freinage est fort* » est la conclusion de la règle.

En général, les règles floues se produisent à partir des connaissances issues de l'expertise humaine. Dans certains cas, elles peuvent être extraites à partir des données qualitatives mesurées sur des instruments.

2.1.2 Principes généraux d'une commande par logique floue

La structure conventionnelle d'une commande floue est présentée par la Figure 2-3. Elle est composée de quatre blocs distincts qui sont : la fuzzification, le moteur d'inférence, la défuzzification et la base de règles.

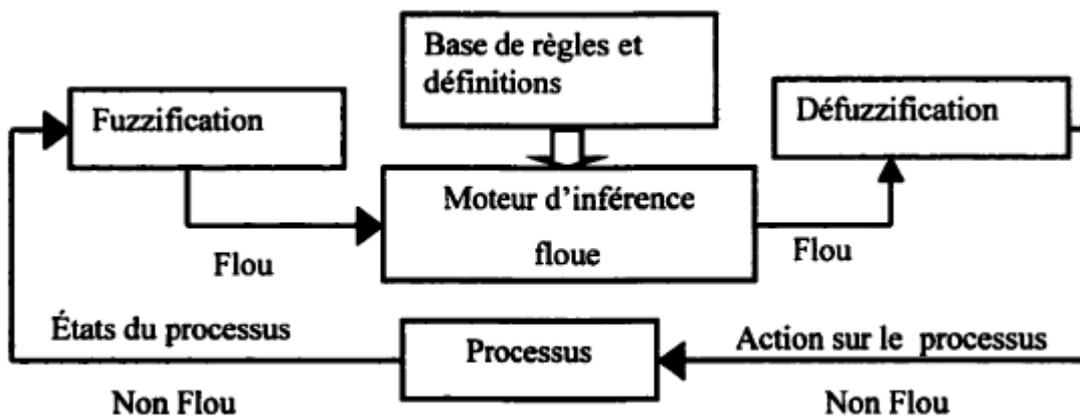


Figure 2- 3 : Structure conventionnelle d'une commande floue [CAO, 1997]

2.1.2.1 Base de règles et définitions

On regroupe dans ce bloc, d'existence virtuelle, l'ensemble des définitions utilisées dans la commande floue (univers de référence, partitions floue, choix des opérateurs flous...), ainsi que la base de règles « SI...ALORS... » de la stratégie de contrôle.

- Les définitions sont utilisées pour établir les règles de commande et manipuler les données floues dans un régulateur par logique floue (RLF).
- La base de règle représente la stratégie de commande linguistique.

2.1.2.2 Fuzzification

La fuzzification effectue la transformation d'une valeur réelle en une valeur linguistique à l'entrée du système. En d'autres termes, cette étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque variable d'entrée à chaque état. Celui-ci est déterminé à l'aide des fonctions d'appartenance définies dans le système.

2.1.2.3 Mécanisme d'inférence

Le moteur d'inférence est le cœur d'un RLF, qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue.

Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU (min et max). L'opérateur ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles.

2.1.2.4 Défuzzification

En sortie, le système flou ne peut pas communiquer des valeurs floues qu'il peut seul exploiter. Il lui est nécessaire de fournir des valeurs numériques précises : C'est le rôle de la défuzzification. Cette étape s'effectue toujours à l'aide des fonctions d'appartenances. A partir des degrés d'appartenance, on obtient autant de valeurs qu'il y a d'états. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette opération, mais pas de procédure permettant de conclure sur le choix de la meilleure méthode. Les méthodes les plus couramment utilisées sont la méthode du centre de gravité ou celle de la moyenne des abscisses des maximums.

2.1.3 Avantages et inconvénients de la logique floue

2.1.3.1 Avantages

- ✓ Facilité d'implantation,
- ✓ Solution efficace pour des problèmes complexes,
- ✓ Intégration de l'expertise humaine sous forme de règles simples,
- ✓ Robustesse vis-à-vis des incertitudes.

2.1.3.2 Inconvénients

- ✓ Les performances dépendent de l'expertise,
- ✓ Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse,...

Après avoir présenté quelques notions générales sur la logique floue, on s'intéresse dans la section suivante à la technique des réseaux de neurones. Cette technique sera utilisée dans le Chapitre 5 pour apprendre la relation liant les paramètres pertinents sélectionnés des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma (entrées du réseau de neurones) aux propriétés spécifiques recherchées (sorties du réseau de neurones). Ce choix est justifié par le fait que les réseaux de neurones sont des approximateurs universels parcimonieux qui se caractérisent par leur forte non linéarité, leur capacité d'apprentissage à partir des données expérimentales et leur adaptabilité aux données imprécises et manquantes.

2.2 Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones constituent une famille de fonctions non linéaires paramétrées dont le fonctionnement est inspiré de l'architecture du cerveau humain. Ils proposent une approche implicite de type « boîte noire » de la représentation des connaissances très analogue à la démarche de l'identification des systèmes en automatique. Ces techniques sont appliquées, avec succès, à la modélisation des systèmes industriels dans lesquels les relations entre les variables d'entrée et de sortie sont complexes et les règles de fonctionnement sont inconnues. Ils demeurent toutefois un sujet de grand intérêt pour les chercheurs qui désirent améliorer les performances de ces réseaux et étendre leurs champs d'applications.

2.2.1 Les neurones

2.2.1.1 Le neurone biologique

Le cerveau est constitué d'un très grand nombre de cellules appelées neurones dont chacune est constituée d'un corps cellulaire et de prolongements : les dendrites et l'axone qui représentent respectivement les entrées de neurone et sa sortie. Les neurones communiquent entre eux en émettant des signaux électriques. En effet, chaque neurone reçoit en entrée les signaux provenant des autres par des synapses, et émet en sortie une information par son

axone. Cependant, cette émission ne se fait que si la valeur numérique d'une certaine fonction des potentiels d'entrée atteint un seuil d'activation.

La transmission, entre deux neurones n'est pas directe. Au niveau de synapse, il existe un espace intercellulaire à travers lequel le signal électrique ne peut pas se propager. La transmission se fait alors par l'intermédiaire de substances chimiques, les neuromédiateurs. Suivant le type de la synapse, l'activité d'un neurone peut renforcer ou diminuer l'activité de ces voisins. On parle ainsi de synapse excitatrice (qui renvoie un signal de sortie inversement proportionnel au signal d'entrée).

2.2.1.2 Le neurone formel

Le modèle de neurone formel, conçu par Mac Culloch et Pitts, est un modèle mathématique très simple dérivé d'une analyse de la réalité biologique. Il s'agit donc des neurones informatiques qui sont basés sur le fonctionnement des neurones biologiques. Ils peuvent être représentés comme des mini-fonctions possédant plusieurs entrées et une sortie unique qui se ramifie pour alimenter un nombre variable de neurones avals. La Figure 2-4 montre la structure d'un neurone artificiel.

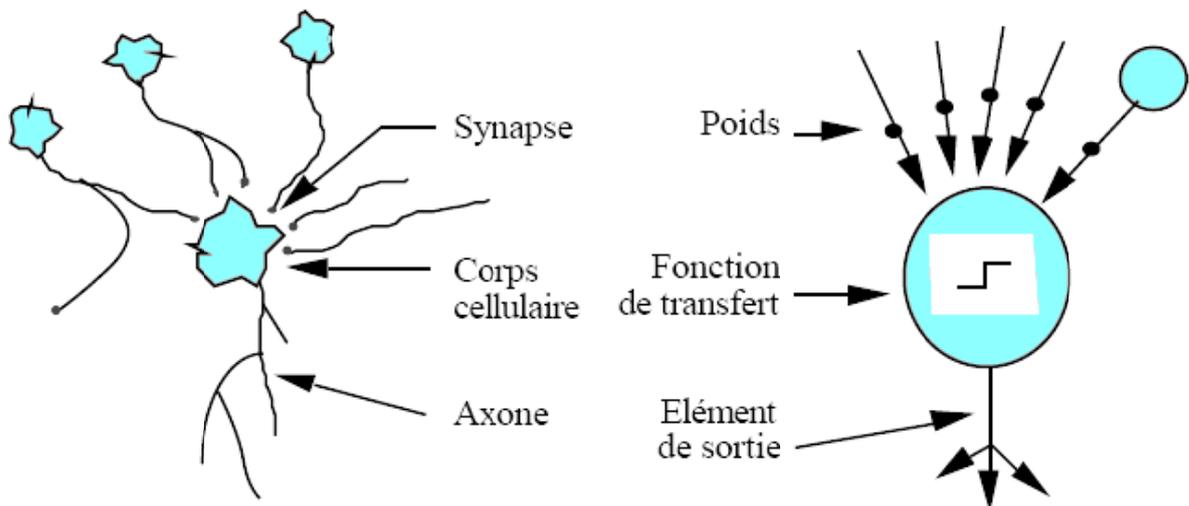


Figure 2- 4 : Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel [TOUZET, 1992]

Le neurone attribue à chaque entrée i un poids w_i représentatif de la force de la connexion. Il calcule la somme pondérée (α) de ses entrées selon l'expression suivante :

$$\alpha = \sum w_i \cdot e_i \quad (2-6)$$

Si cette somme est supérieure à un certain seuil, la sortie sera égale à 1, sinon elle sera égale à 0.

La modélisation des synapses est assez simple. En effet, on se contente d'introduire la notion de synapse excitatrice ou inhibitrice en multipliant la sortie de neurone par (1) ou (-1) avant de la transmettre aux autres neurones.

Pour fonctionner, un neurone formel utilise des entrées qui sont des grandeurs réelles. Si on représente les valeurs observées par le neurone sous la forme d'un vecteur, le neurone réalise alors un découpage de son espace d'entrée en deux zones : la zone d'activité pour laquelle les vecteurs donnent une sortie égale à 1 et la zone d'inactivité dont les vecteurs donnent une sortie égale à 0. Ainsi, un unique neurone est très limité car il ne sait calculer qu'une séparation linéaire. Afin de repousser cette limitation, on interconnecte plusieurs neurones, comme dans un cerveau humain.

2.2.2 Architecture des réseaux de neurones

Dans un réseau, les neurones sont regroupés en plusieurs couches. Les entrées des neurones de la première couche représentent les entrées du réseau. Cependant, les sorties des neurones de la dernière couche représentent les sorties du réseau. De même, les sorties d'une couche sont reliées aux entrées de la couche suivante. Et ainsi, l'information donnée au réseau va donc se propager de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant soit par aucune, une ou plusieurs couches cachées (couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur).

Généralement, on distingue deux types des réseaux de neurones : les réseaux non bouclés (ou statiques ou acycliques) et les réseaux bouclés (ou dynamiques ou récurrents).

2.2.2.1 Les réseaux de neurones non bouclés

Un réseau de neurones non bouclé, appelé aussi réseau statique, est un réseau dont le graphe des connexions est acyclique : si l'on se déplace dans le réseau, à partir d'un neurone quelconque, en suivant les connexions, on ne peut pas revenir au neurone de départ [PERSONNAZ, 2003]. Il réalise une fonction algébrique linéaire de ses entrées.

Pour la modélisation de processus, on utilise généralement, un réseau comprenant un neurone de sortie linéaire (leur fonction d'activation est l'identité). La sortie d'un tel réseau est une combinaison linéaire paramétrée de fonctions non linéaires paramétrées des variables.

En fonction de la topologie des connexions entre neurones, on distingue deux catégories de réseaux non bouclés : les réseaux à couches et les réseaux à fonctions radiales.

2.2.2.1.1 Les réseaux à couches

a) *Le perceptron monocouche*

C'est historiquement le premier réseau de neurones artificiel ; C'est le perceptron de Rosenblatt. Il est constitué en fait d'un seul neurone et permet de résoudre des opérations logiques simples. Il est cependant très limité vu qu'il ne peut résoudre que des problèmes linéairement séparables [NAGY, 1991].

b) *Le perceptron multicouches*

Le perceptron multicouches (noté MLP pour Multi layer Perceptron en anglais) est une extension du précédent, avec une ou plusieurs couches cachées. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Les neurones de la première couche sont reliés au monde extérieur et reçoivent tous le même vecteur d'entrée (c'est en fait l'entrée du réseau). Ils calculent alors leurs sorties qui sont transmises aux neurones de la deuxième couche, etc. Les sorties des neurones de la dernière couche forment la sortie du réseau. La Figure 2-5 montre un exemple de réseau de neurones non bouclé à une couche des neurones cachés.

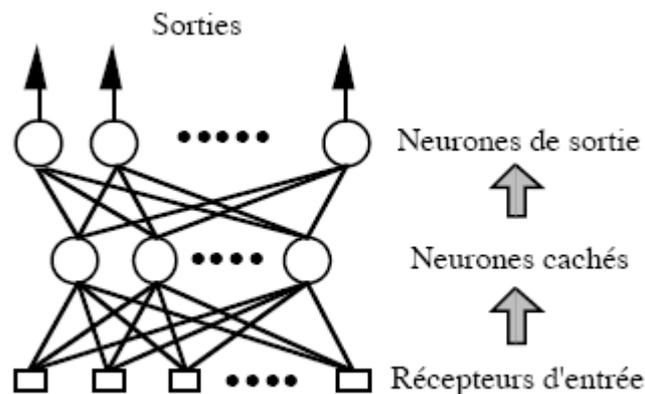


Figure 2- 5 : Exemple de réseau de neurones non bouclé à une couche de neurones cachés [RIVALS, 1996]

Les fonctions d'activation utilisées dans ce type de réseaux sont principalement sigmoïdes. Il peut résoudre des problèmes non linéairement séparables. Mais, leur manipulation est difficile. Leur phase d'apprentissage s'effectue différemment : Il est nécessaire d'utiliser un algorithme dit de rétro-propagation qui corrige les poids des connexions des différentes couches en fonction des erreurs commises.

2.2.2.1.2 Les réseaux à fonction radiale

Ce sont les réseaux que l'on nomme aussi RDF (« Radial Basis Functions » en anglais). Ils représentent l'architecture la plus générale du réseau non bouclé. Dans un tel réseau, chaque neurone reçoit les entrées du réseau et les sorties des neurones de numéro inférieur. Le neurone de sortie (linéaire) réalise une somme pondérée des sorties des neurones cachés. Les fonctions de base utilisées ici sont des fonctions Gaussiennes.

La Figure 2-6 montre un exemple de réseau de neurones non bouclé complètement connecté.

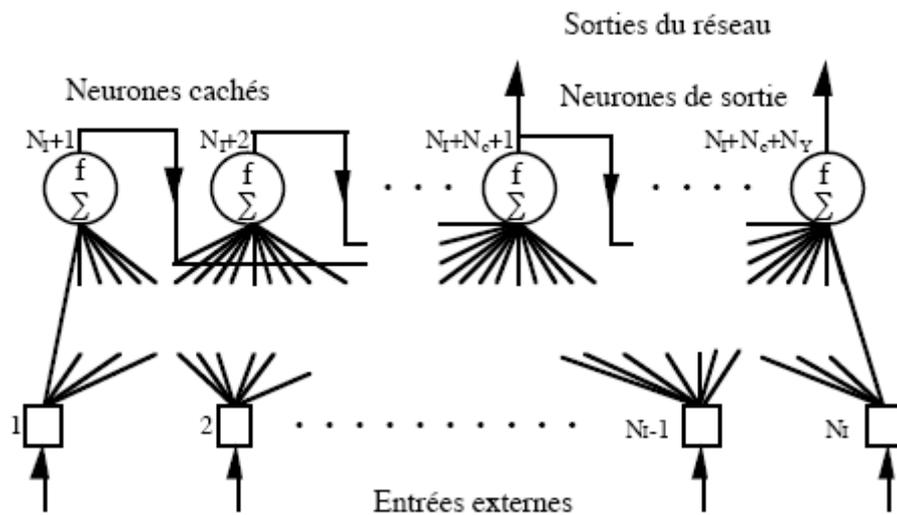


Figure 2- 6 : Réseau de neurones non bouclé complètement connecté [RIVALIS, 1995]

2.2.2.2 Les réseaux bouclés (ou récurrents)

Un réseau de neurones bouclé, appelé aussi réseau dynamique, est un réseau dont le graphe de connexions peut contenir des cycles [PERSONNAZ, 2003]. La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même ; cela n'est évidemment concevable que si la notion du temps est explicitement prise en considération. Ainsi, à chaque connexion d'un réseau de neurone bouclé, est associé un retard (entier positif ou nul).

Pour que le réseau soit causal, tout cycle du graphe des connexions d'un réseau de neurones bouclé doit comprendre au moins une connexion de retard non nul. De même, il a été montré que tout réseau de neurone bouclé, aussi complexe soit-il, peut être mis sous une forme canonique qui est une représentation d'état minimale [OUSSAR, 1998], [LUCEA, 2006]. Elle est constituée d'un réseau non bouclé, et de connexions de retard unité ramenant les sorties de ce réseau vers ses entrées.

La Figure 2-7 montre la forme canonique d'un réseau de neurones bouclé.

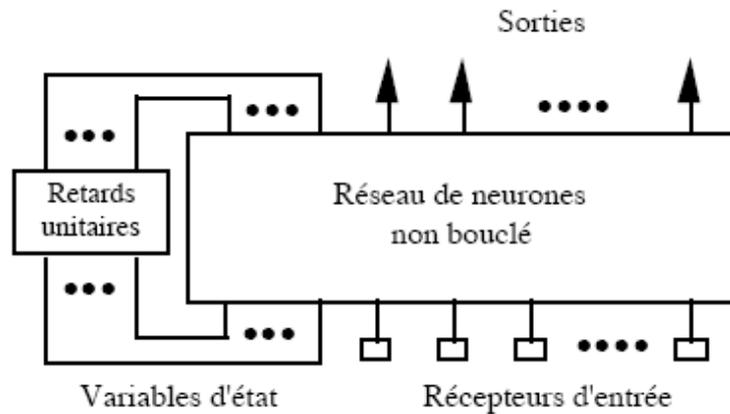


Figure 2- 7 : Forme canonique d'un réseau de neurones bouclé [RIVALS, 1996]

Dans notre étude, nous nous limiterons aux cas de réseaux de neurones non bouclés.

2.2.3 Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est le but principal de développement de modèles à base des réseaux de neurones. Il est réalisé par la modification des poids des connexions du réseau, généralement par des algorithmes spécifiques, afin d'obtenir des valeurs optimales à ces poids. Cette opération est en général effectuée à partir d'exemples de comportement que l'on veut imiter. Une fois l'apprentissage terminé, le réseau doit être capable, non seulement de restituer les exemples de comportement appris, mais surtout de prévoir avec précision des comportements non appris : c'est la faculté de généralisation.

2.2.3.1 Type d'apprentissage

Suivant la règle utilisée pour l'apprentissage, on distingue deux principaux types d'apprentissage: supervisé et non supervisé.

2.2.3.1.1 L'apprentissage supervisé

Un apprentissage est dit supervisé lorsque l'on force le réseau à converger vers un état final précis, en même temps qu'on lui présente un motif. On connaît donc, en tout point ou seulement en certains points, les valeurs que doit avoir la sortie du réseau en fonction des entrées correspondantes. En d'autres termes, dans ce cas d'apprentissage, on teste le réseau

dans des situations connues et on cherche à obtenir la sortie voulue. On effectue alors la modification des poids pour retrouver cette sortie imposée.

2.2.3.1.2 L'apprentissage non supervisé

A l'inverse du cas précédent, un apprentissage est dit non supervisé lorsque le réseau est laissé libre de converger vers n'importe quel état final quand on lui présente un motif. Le réseau à apprentissage non supervisé est donc capable de « mémorisation » c'est-à-dire qu'il raisonne par analogie avec ce qu'il a déjà effectué. Ces réseaux sont souvent appelés « auto-organiseurs » ou bien « à apprentissage compétitif ».

2.2.3.2 Algorithme d'apprentissage

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids des connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée. Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre parmi lesquels on peut citer l'algorithme de rétro-propagation du gradient, l'algorithme de Newton, la méthode Quasi-Newton, la méthode du gradient conjugué, l'algorithme de Levenberg Marquardt, etc. Cependant, le choix d'un entre eux reste difficile puisque pour un même problème leur efficacité sera différente. Il faut donc choisir l'algorithme d'apprentissage en fonction du problème à traiter.

Dans le cas du perceptron multicouches, l'algorithme d'apprentissage le plus utilisé est l'algorithme de rétro-propagation du gradient. Cet algorithme a été créé en généralisant les règles d'apprentissage de Widrow-Hoff aux réseaux multicouches à fonction de transfert non linéaire. Il a été développé en particulier par Rumelhart et Le Cun en 1986 [LE CUN, 1988]. Il est basé sur le principe suivant : on présente itérativement les exemples au réseau, après avoir initialiser tous les poids à des valeurs aléatoires, et on procède au calcul de la sortie de propagation à travers les couches, de la couche d'entrée vers la couche de sortie en passant par les couches cachées. On peut alors mettre en évidence les erreurs apparaissant sur les neurones de sortie. A partir de ces erreurs est calculé le gradient de l'erreur qui est à son tour propagé de la couche de sortie vers la couche d'entrée, d'où le terme de rétro-propagation. Cela permet la modification des poids du réseau. La fin de la phase d'apprentissage peut être décidée lorsque l'erreur quadratique sur l'ensemble des exemples devient inférieure à un seuil prédéfini.

Mise en œuvre de l'algorithme de rétro-propagation du gradient

La mise en œuvre de l'algorithme de rétro-propagation du gradient peut se résumer comme suit:

Phase 1: Initialisation de l'ensemble des poids synaptiques $\{W_{ji}\}$ à des valeurs aléatoires.

Phase 2: Pour chaque donnée d'apprentissage n :

- a. Calculer les sorties observées en propageant les entrées vers l'avant ;
- b. Ajuster les poids en rétro-propageant l'erreur observée:

$$W_{ji}(n) = W_{ji}(n-1) + \Delta W_{ji}(n) .$$

L'erreur est minimisée à chaque itération en faisant évoluer les $\{W_{ji}\}$ suivant la courbe de plus grande pente sur la surface définie par une fonction d'erreur $E(n)$ caractérisant l'écart entre la réponse réelle du réseau et la réponse désirée. On a alors $\Delta W_{ji}(n)$ qui est proportionnel à l'opposée du gradient de l'erreur.

$$\Delta W_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial W_{ji}(n)} = \eta \delta_j(n) \cdot y_i(n)$$

où le gradient local $\delta_j(n)$ est défini par :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \delta_j(n) = e_j(n) y_j(n) \cdot [1 - y_j(n)] & \text{pour la couche de sortie} \\ \delta_j(n) = y_j(n) \cdot [1 - y_j(n)] \sum_{k \in C} \delta_k(n) W_{kj}(n) & \text{pour une couche cachée} \end{array} \right.$$

La valeur du taux d'apprentissage η a un effet significatif sur les performances du réseau. S'il est très petit, la convergence des poids et de biais vers leur optimum sera lente. Par contre, s'il est important, l'algorithme risque de générer un comportement oscillant de l'optimisation, sans obtention d'un véritable minimum. Généralement, ce paramètre doit être compris entre 0 et 1 pour assurer la convergence de l'algorithme vers une solution optimale.

Phase 3: Répéter les étapes 1 et 2 jusqu'à un nombre maximum d'itérations ou jusqu'à ce que la valeur de l'erreur quadratique moyenne soit inférieure à un certain seuil.

Dans le cadre de notre étude, nous allons utiliser l'algorithme de Levenberg-Marquardt (voir Chap 5, § 5.2.3.2). Ce choix est justifié par le fait que cet algorithme est plus rapide et assure une meilleure convergence vers un minimum de l'erreur quadratique, pour les problèmes d'approximation des fonctions où le nombre des poids de réseau n'est pas très élevé [KIM, 2004].

2.2.4 Propriétés fondamentales des réseaux de neurones non bouclés

Les réseaux de neurones non bouclés possèdent la propriété d'approximation parcimonieuse. Cette expression traduit deux propriétés distinctes : d'une part, les réseaux de neurones sont des approximateurs universels, et, d'autre part, une approximation à l'aide de réseaux de neurones nécessite, en général, moins de paramètres ajustables que les approximateurs usuels.

2.2.4.1 L'approximation universelle

La propriété d'approximation universelle peut s'énoncer de la façon suivante [CYBENKO, 1989], [FUNAHASHI, 1989], [DREYFUS, 1998]:

« Toute fonction bornée suffisamment régulière peut être approchée uniformément, avec une précision arbitraire, dans un domaine fini de l'espace de ses variables, par un réseau de neurones comportant une couche de neurones cachés en nombre fini, possédant tous la même fonction d'activation, et un neurone de sortie linéaire ».

Cette propriété justifie notre choix de réseaux de neurones à une seule couche cachée dans la suite de notre travail. Le seul degré de liberté qui subsiste pour déterminer l'architecture de réseau est le nombre de neurones cachés. Ce nombre doit être choisi convenablement suivant la nature du problème pour obtenir la précision souhaitée.

2.2.4.2 La parcimonie

Lorsque l'on veut modéliser un processus à partir des données, on cherche toujours à obtenir les résultats les plus satisfaisants possibles avec un nombre minimum de paramètres ajustables. Dans cette optique, Hornik [HORNİK, 1994] a montré que :

« Si le résultat de l'approximation (c'est-à-dire la sortie du réseau de neurones) est une fonction non linéaire des paramètres ajustables, elle est plus parcimonieuse que si elle est une fonction linéaire de ces paramètres. De plus, pour des réseaux de neurones à fonction d'activation sigmoïdale, l'erreur commise dans l'approximation varie comme l'inverse du nombre de neurones cachés, et elle est indépendante du nombre de variables de la fonction à approcher. Par conséquent, pour une précision donnée, donc pour un nombre de neurones cachés donné, le nombre de paramètres du réseau est proportionnel au nombre de variables de la fonction à approcher » [DREYFUS, 2004].

Cette propriété exprime le fait que les réseaux de neurones ont besoin d'un petit nombre de paramètres ajustables pour réaliser correctement leur tâche. En effet, ils ont besoin de moins de données que les méthodes de régression classiques pour élaborer un modèle non linéaire de précision donnée et sont de plus réglables dans un peu de temps; de manière équivalente, un réseau permet, à partir de la même quantité de données, de réaliser une approximation plus précise. En particulier, le nombre de paramètre varie essentiellement de manière linéaire en fonction du nombre de variables de la fonction qu'on cherche à approcher, alors qu'il varie beaucoup plus rapidement (voire exponentiellement) avec la dimension de l'espace des entrées dans le cas des approximateurs usuels.

Ainsi, dès qu'un problème fait intervenir plus que deux variables, les réseaux de neurones apparaissent comme étant des outils statistiques non linéaires, particulièrement intéressant du point de vue de temps de calcul (petit nombre de paramètres à calculer) et surtout du point de vue de la quantité d'information nécessaire pour le calcul des coefficients [RIVALS, 1995].

Bien entendu, cette propriété est démontrée de manière générale, et peut se révéler inexacte pour un problème particulier. Elle constitue néanmoins une justification fondamentale de l'utilisation des réseaux de neurones, et elle est avérée dans la très grande majorité des problèmes pratiques.

2.2.4.3 Modélisation statistique

Les réseaux de neurones, en raison de leurs propriétés fondamentales, mentionnées précédemment, sont des bons candidats pour réaliser une approximation de la fonction de régression. C'est ce qui justifie l'utilisation pratique des réseaux de neurones : la recherche d'une approximation de la fonction de régression à partir d'un nombre fini des points expérimentaux (exemple d'apprentissage). L'utilisation des réseaux de neurones entre donc complètement dans le cadre de méthodes statistiques d'approximation d'une fonction de régression. De telles méthodes ont été très largement développées pour les fonctions de régression linéaires. L'apport des réseaux de neurones réside donc dans leur capacité à modéliser des processus non linéaires et multi-variables.

2.2.5 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones

2.2.5.1 Avantages

L'avantage des réseaux de neurones est qu'ils acceptent des données incomplètes et bruitées. Ils ont pour particularité d'être le seul composant informatique qui implémente directement le principe de l'induction. De plus, grâce à leur capacité de généralisation, les réseaux neuronaux sont généralement utilisés dans des problèmes de nature statistiques et perceptives, telles que la classification ou l'évaluation. De même, ils présentent une grande robustesse face aux défaillances techniques et s'enrichissent de leurs expériences.

2.2.5.2 Inconvénients

Les réseaux de neurones possèdent certains inconvénients dont on peut citer les quelques points suivants :

- ✓ Les réseaux de neurones artificiels ont besoin de cas réels servant d'exemples pour leur apprentissage. Ces cas doivent être d'autant plus nombreux que le problème est complexe et que sa topologie est peu structurée.
- ✓ L'efficacité de l'algorithme d'apprentissage utilisé. Certains algorithmes, comme le gradient, se trouvent facilement piégés dans des minima locaux.
- ✓ La difficulté d'intégrer les connaissances des experts.
- ✓ La difficulté d'interprétation et de compréhension de la logique de raisonnement.

2.2.6 Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels

L'adaptation des réseaux de neurones à la modélisation des systèmes complexes est souvent recommandée, à cause notamment des capacités d'apprentissage du réseau en milieu incertain. La structure même du réseau permet un apprentissage des relations non linéaires entre les entrées et sorties d'un système de type « boîte noire ». En fait, les réseaux de neurones s'adaptent bien aux problèmes où les données sont entachées de bruit.

Ces qualités sont très utilisées dans bien des domaines d'applications tels que l'industrie (contrôle qualité, diagnostic de panne, commande des robots,...), l'environnement (prévision météorologique, analyse et évaluation des risques, gestion des ressources,...), le finance (prévision et modélisation du marché, attribution des crédits,...), la télécommunication et l'informatique (analyse de signal, compression des données, synthèse de la parole,...).

Dans ce travail, on s'intéresse à l'utilisation des réseaux de neurones pour la modélisation d'un procédé de traitement des surfaces textiles par plasma. Dans ce cadre, on trouve dans la littérature quelques exemples de recherches effectuées à l'aide des réseaux de neurones dans le domaine des procédés plasma. Parmi ces travaux, on peut citer les suivants :

Allan et al. [ALLAN, 2002] ont exploré l'approche utilisant les réseaux de neurones pour prédire le caractère hydrophobe d'un tissu de coton traité par un plasma à pression réduite utilisant l'hexafluoroéthane (C_2F_6) comme gaz plasmagène. Pour cela, ils ont utilisé un perceptron constitué d'une seule couche de neurones cachés. Ils ont sélectionné, en tant que données d'entrée, trois paramètres du procédé plasma qui sont la puissance électrique, le temps de traitement et le débit du gaz plasmagène. Le paramètre de sortie est l'indice de repellence qui permet d'estimer le caractère hydrophobe de tissu. Ils ont remarqué que lorsque la quantité de données est limitée, le réseau tend à sur-ajuster. De ce fait, pour construire un modèle de réseau de neurones robuste, l'ensemble d'apprentissage doit être suffisamment riche et représentatif. Les auteurs ont conclu que les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour prévoir les conditions opératoires optimales des installations industrielles.

Kim et al. [KIM, 2002b] ont utilisé les réseaux de neurones pour modéliser un procédé de gravure d'un film de dioxyde de silicium par plasma radiofréquence utilisant un mélange CHF_3/CF_4 . Le réseau de neurones utilisé est le perceptron à rétro-propagation du gradient

constitué de trois couches. La couche d'entrée correspond aux paramètres du procédé plasma qui sont la puissance, la pression et les débits de gaz. La sortie du réseau correspond au taux de gravure. La fonction de transfert de la couche de sortie est linéaire alors que la couche de neurones cachés utilise la fonction sigmoïde. La base de données a été divisée en deux ensembles : 9 données pour l'entraînement du réseau et 8 données pour le tester. Malgré la quantité limitée de données, les résultats ont montré que le modèle est capable de prédire le taux de gravure en fonction des conditions du traitement plasma. En fait, les auteurs ont montré que l'utilisation de réseau de neurones a permis d'améliorer la performance du modèle de 43% par comparaison à une méthode de régression statistique. Ils ont conclu que les réseaux de neurones peuvent modéliser la relation entre les entrées et les sorties du procédé plasma.

Chen [CHEN, 2003] a également utilisé un réseau de neurones à rétro-propagation du gradient constitué de trois couches pour modéliser la relation entre les paramètres d'entrée et de sortie d'un procédé de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD). La couche d'entrée du réseau inclut sept paramètres qui sont la température du substrat, la puissance radiofréquence, la pression de la chambre de décharge, les débits de gaz utilisés et le temps de dépôt. La couche de sortie inclut un seul paramètre qui correspond au profil final de gravure par plasma. La base de données a été répartie en 17 données pour l'entraînement et 7 données pour le test. Les résultats ont indiqué que le réseau de neurone s'ajuste bien avec les données expérimentales bien qu'ils y aient quelques écarts. Les auteurs ont conclu que les réseaux de neurones sont capables de généraliser et que les performances du modèle peuvent être améliorées en augmentant la quantité de données d'apprentissage.

Wang et al [WANG, 2007b] ont utilisé une approche neuronale pour étudier l'impact d'un traitement plasma de type décharges à barrière diélectrique sous air sur un film de polyéthylène. Ils ont utilisé la méthode de rétro-propagation de gradient. Le réseau de neurone comporte une seule couche cachée utilisant des fonctions de transfert de type sigmoïde. Les entrées du réseau correspondent aux paramètres de traitement par plasma (tension de décharge, temps de traitement, distance entre les électrodes). La sortie du réseau correspond à l'angle de contact avec l'eau. La base de données a été répartie en 36 données pour l'entraînement et 11 données pour le test. Les résultats ont montré que la capacité de

généralisation du modèle est bonne. Les auteurs ont conclu que les réseaux de neurones constitue une alternative intéressante pour étudier la modification de surface par plasma.

Les réseaux de neurones sont donc de bons outils pour modéliser les relations entre variables d'entrée et de sortie des procédés plasma, à partir d'observations expérimentales mises à disposition afin de généraliser sur de nouvelles données, sous réserve que celles-ci soient suffisamment nombreuses et représentatives. Dans notre cas, les réseaux de neurones seront essentiellement utilisés pour apprendre la relation liant les paramètres pertinents sélectionnés des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma (entrées) aux propriétés spécifiques recherchées (sorties) (Figure 2-8).

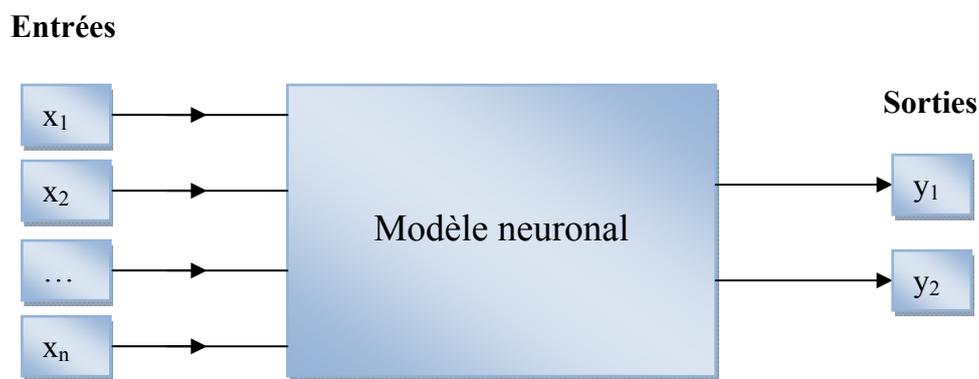


Figure 2- 8 : Réseau de neurones artificiel à n variables d'entrée et deux sorties, utilisé en modélisation statistique non linéaire vis-à-vis des paramètres, par apprentissage non bouclé

Dans la partie suivante, nous nous attacherons à donner un aperçu général sur les méthodes de sélection de variables et à présenter en détails la méthode que nous allons utiliser dans notre travail pour sélectionner les paramètres pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma. La sélection des paramètres pertinents constitue en effet la première étape de la procédure de modélisation. Elle permet notamment de réduire la dimension de données et d'éliminer les entrées qui n'ont qu'une faible influence sur la sortie.

2.3 Sélection de variables pertinentes

2.3.1 Généralités

Dans un système industriel, il existe une quantité importante de variables d'entrée (paramètres de procédé) et de sortie (caractéristiques de qualité du produit). En même temps, le nombre de données expérimentales est très limité en raison notamment de la non-disponibilité des outils de production et des coûts relatifs aux essais. Une modélisation

utilisant la totalité de ces variables d'entrée et de sortie est un problème souvent très complexe et les résultats correspondants sont alors difficiles à interpréter. En fait, le succès d'une méthode de modélisation est fortement lié à la qualité des données et des variables qui les caractérisent. La présence de variables redondantes, bruitées ou corrélées rend le processus d'apprentissage plus difficile. Par conséquent, la sélection de variables pertinentes devra être la première étape dans la procédure de modélisation. L'objectif de cette sélection consiste à identifier les variables d'entrée pertinentes par rapport à une variable de sortie. De cette manière, la complexité du modèle peut être largement réduite et les résultats obtenus peuvent être plus interprétables.

La sélection de variables joue donc un rôle important dans le prétraitement de données vu qu'elle permet de choisir le meilleur sous-ensemble des variables existantes pour construire un modèle de prédiction. Cet ensemble doit contenir les variables les plus robustes et les plus discriminantes. La sélection de variables destinées à être utilisées dans un modèle est donc une problématique importante qui a fait l'objet de nombreuses recherches [LEARY, 1998]. De nombreux travaux ont été effectués afin de réduire le nombre de variables d'entrée à partir des données. Dans ce contexte, les méthodes existantes sont généralement réparties en deux grandes catégories : l'extraction des variables et la sélection des variables.

Dans la première catégorie, toutes les caractéristiques initiales sont projetées sur un sous espace multidimensionnel par minimisation d'un critère représentant la perte d'information. Cette catégorie comprend notamment l'Analyse en Composantes Principales (ACP) [REGNER, 2008], la régression linéaire multiple pas-à-pas (SMLR) [RAKOMTOMALALA, 2009] et la régression partielle des moindres carrés « Partiel Least Square, PLSR » [YENIAY, 2002], qui effectuent une transformation linéaire d'un vecteur de caractéristiques depuis l'espace original vers le sous espace.

Dans la deuxième catégorie, les variables pertinentes sont directement sélectionnées à partir des variables initiales. Un algorithme de sélection est souvent conçu pour maximiser les distances inter-classes et minimiser les distances intra-classes. Dans cette catégorie, les techniques de recherche les plus utilisées sont la Recherche Séquentielle en Avant (Forward Search, FS) et la Recherche Séquentielle en Arrière (Backward Search, BS) qui permettent de rajouter ou d'éliminer itérativement des variables [BLUM, 1997]. Ces méthodes sont connues pour leur simplicité de mise en œuvre et leur rapidité. Cependant, comme elles n'explorent pas tous les sous-ensembles possibles de variables et ne permettent pas de retour en arrière pendant la recherche, elles sont donc sous-optimales. Pour réduire cet effet, des méthodes

alternent les procédures FS et BS, permettant ainsi d'ajouter des variables et puis d'en retirer d'autres.

En général, les méthodes d'extraction conduisent souvent à des classificateurs plus précis que les méthodes de sélection, mais les variables extraites sont physiquement moins interprétables que les variables sélectionnées [KOEHL, 2006]. De plus, dans certains cas, les méthodes basées sur une dépendance linéaire ne peuvent pas tenir compte des relations non linéaires entre l'espace d'entrée et l'espace de sortie. L'utilisation des modèles non linéaires devient alors indispensable. Par conséquent, les méthodes de sélection sont plus pratiques dans le cas de modélisation des systèmes complexes.

De nombreuses méthodes de sélection de variables ont été développées dans la littérature. Parmi elles, les méthodes bien connues sont basées sur les arbres de décision [QUINLAN, 1986], la méthode de mesure d'information mutuelle [FLEURET, 2004], la méthode des plus proches voisins, la méthode utilisant la génération d'hyper-volumes [THAWONMAS, 1997], la méthode de « Wrapper Model » [SOTO, 2008] et la méthode des réseaux connexionnistes [VERIKAS, 2002] qui permettent de retrancher les variables redondantes et peu informatives. Cependant, la performance de ces méthodes est fortement liée à la quantité et à la qualité des données d'apprentissage et aux critères de sélection définis, qui varient en fonction du problème traité. De ce fait, ces méthodes ne sont pas efficaces pour résoudre les problèmes industriels dans lesquels le nombre de données d'apprentissage est faible. Pour pallier à cet inconvénient, une méthode de sélection basée sur la sensibilité des données numériques a été développée [KOEHL, 2003]. Cette méthode définit un critère de performance en postulant un principe de sensibilité des variables d'entrée. En fait, au lieu d'estimer la séparabilité inter-classe et la compacité intra-classe, la méthode proposée calcule les distances entre les échantillons individuels dans l'espace d'entrée et celles dans l'espace de sortie. En s'appuyant sur ces distances, on peut évaluer la sensibilité des variables soumises à la variation dans l'espace d'entrée par rapport à celles répercutées dans l'espace de sortie. Le critère de sensibilité peut être défini selon les deux principes suivants :

- 1) Si une faible variation de la variable d'entrée provoque une grande variation de la variable de sortie, alors la sensibilité de cette variable est grande.
- 2) Si une grande variation de la variable d'entrée provoque une faible variation de la variable de sortie, alors la sensibilité de cette variable est petite.

Lorsqu'on élimine une variable à partir d'un ensemble de variables d'entrée, on calcule la sensibilité correspondante aux variables d'entrée restantes. Ensuite, on la compare avec les valeurs de sensibilité correspondant aux retraits des autres variables d'entrée. Une variable est considérée comme sensible si la sensibilité des variables restantes est plus faible.

Après avoir présenté succinctement les méthodes de sélection de variables, nous nous limiterons à la sensibilité des données mesurées. Par la suite, deux méthodes de calcul de la sensibilité seront détaillées : la première méthode est linéaire tandis que l'autre utilise des règles floues.

2.3.2 Critère de sensibilité numérique

Le critère de sensibilité numérique prend en considération les valeurs numériques mesurées directement sur les échantillons. Il prend ses valeurs dans l'intervalle [0 1] et il est défini de telle façon que sa valeur (SN) augmente lorsque la variable d'entrée x_k devient plus pertinente. Il est basé sur une mesure de sensibilité. Une entrée est considérée comme pertinente si une petite variation de cette dernière entraîne une forte variation de la propriété fonctionnelle (variable de sortie). La valeur de ce critère tend vers 1, lorsque le paramètre d'entrée mesuré influe largement sur la propriété fonctionnelle.

Soit m le nombre des paramètres d'entrée qui peuvent avoir une influence sur un paramètre de sortie. Notons $X_s = (x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sk}, \dots, x_{sm})^T$ le vecteur d'entrée correspondant aux paramètres de données mesurées sur le produit et $Y_s = (y_{s1}, y_{s2}, \dots, y_{sj}, \dots, y_{sn})^T$ le vecteur des sorties attendues sur ce même produit et correspondant à l'échantillon s ($s \in \{1, \dots, z\}$). Toutes les données mesurées sur ces z échantillons sont préalablement normalisées dans [0 1], afin de retrancher les phénomènes d'échelles. Le critère de sensibilité numérique par rapport à y_l après élimination de la variable d'entrée x_k est défini par :

$$SN_{k,l} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\sum_{\substack{i,j \in \{1, \dots, z\} \\ i \neq j}} \frac{d(y_{il}, y_{jl})}{d'_k(X_i, X_j)} \right) \quad (2-7)$$

où $d'_k(X_i, X_j) = \sqrt{d^2(X_i, X_j) - d_k^2(X_i, X_j)}$

$d_k(X_i, X_j)$ est la projection de $d(X_i, X_j)$ sur l'axe x_k ; $d(X_i, X_j)$ la distance Euclidienne entre deux vecteurs d'entrée X_i et X_j ; $d(y_{il}, y_{jl})$ la distance Euclidienne entre y_{il} et y_{jl} .

Plus le critère de sensibilité $SN_{k,l}$ est grand (proche de 1), plus la variable correspondante x_k est sensible aux données mesurées.

Cette méthode de sélection est très sensible aux données mesurées. Pratiquement, lorsque le critère de sélection pour deux variables sont proches l'un de l'autre, il est difficile de les hiérarchiser. C'est pour cette raison que cette méthode a été améliorée par Deng et al. [DENG, 2006], [DENG, 2007], [DENG, 2008] en le transformant en un critère linguistique basé sur la logique floue.

2.3.3 Critère de sensibilité flou

Le critère de sensibilité flou permet de filtrer efficacement les données pour lesquelles les intervalles de variation sont faibles, dans l'espace des données expérimentales disponibles ce qui permet de rendre le critère de sensibilité très robuste, et dans le même temps, d'obtenir un classement par ordre de pertinence plus significatif. Ce résultat reste valide même lorsque le nombre de données d'apprentissage est faible et que ces données sont bruitées. [DENG, 2006], [DENG, 2007], [DENG, 2008]. C'est pour cette raison que nous avons choisi d'utiliser cette méthode pour sélectionner les paramètres pertinents du procédé plasma.

Le critère de sensibilité flou est défini selon le même principe de la section 2.3.1. Ce principe est transformé en une série de règles floues afin de construire un modèle flou pour lequel les variations d'entrées et de sorties Δx et Δy sont considérées comme deux variables d'entrée du modèle et la valeur de sensibilité floue SF est considérée comme sortie (Figure 2-9). Pour simplifier l'écriture, on note de Δx et Δy les variations pour toutes les paires de m échantillons sans répétition.

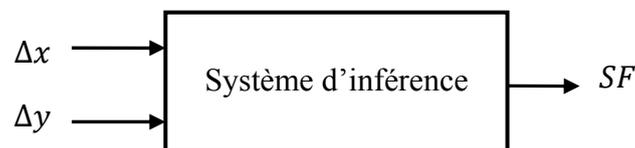


Figure 2- 9 : Modèle flou de sensibilité

Evidemment, SF est une fonction de Δx et Δy , notée $SF = FL(\Delta x, \Delta y)$. Ce modèle inclut une interface de fuzzification, une base de règle floue, un mécanisme d'inférence et une interface de defuzzification. La procédure de fuzzification permet de transformer chacune de Δx et Δy

en trois valeurs floues : *petite (S)*, *moyenne (M)*, *grande (B)* (Figure 2-10), et *SF* en une variable floue variant entre 0 et 1 et composée de cinq valeurs floues: *très petite (VS)*, *petite (S)*, *moyenne (M)*, *grande (B)*, *très grande (VB)* (Figure 2-11).

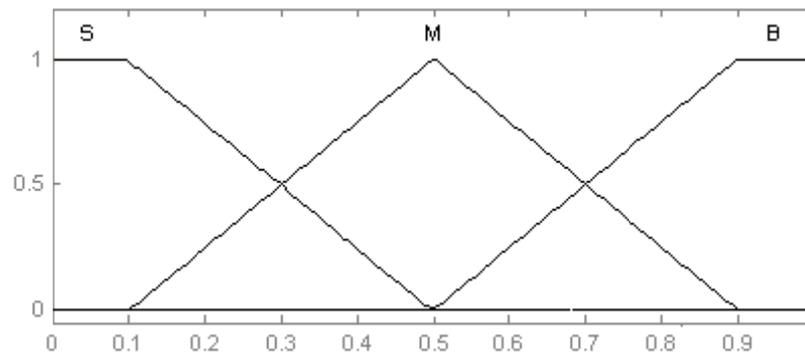


Figure 2- 10 : Valeurs floues pour Δx et Δy

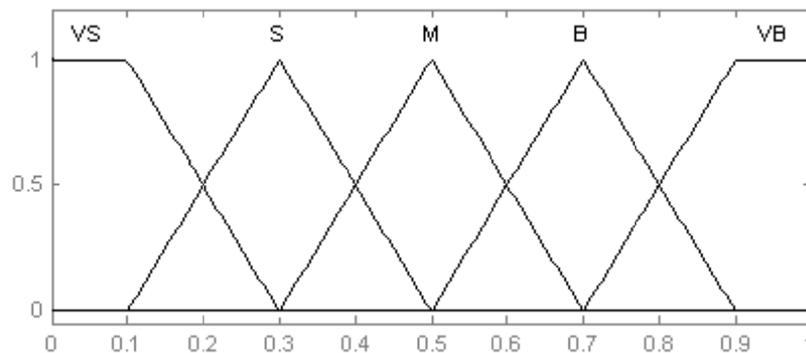


Figure 2- 11 : Valeurs floues pour SF

Neuf règles floues sont construites à partir de l'expérience humaine recueillie sur les sensibilités en fonction des variations des variables d'entrée et de sortie :

- 1) Si Δx est petite et Δy est petite alors SF est petite.
- 2) Si Δx est petite et Δy est moyenne alors SF est grande.
- 3) Si Δx est petite et Δy est grande alors SF est très grande.
- 4) Si Δx est moyenne et Δy est petite alors SF est petite.
- 5) Si Δx est moyenne et Δy est moyenne alors SF est moyenne.
- 6) Si Δx est moyenne et Δy est grande alors SF est grande.
- 7) Si Δx est grande et Δy est petite alors SF est très petite.
- 8) Si Δx est grande et Δy est moyenne alors SF est petite.
- 9) Si Δx est grande et Δy est grande alors SF est moyenne.

La première règle est ajoutée pour limiter les effets pervers liés aux bruits à la fois sur les données mesurées à l'entrée du système et sur les données mesurées à la sortie du système. La méthode de defuzzification de Mamdani [MAMDANI, 1975] est employée et conduit à l'estimation de la valeur de la sensibilité $SF = FL(\Delta x, \Delta y)$. De la même façon, il est aisé d'obtenir la valeur correspondante de sensibilité lorsqu'on procède au retrait d'une variable x_k , à savoir $SF_k = FL(\Delta x^k, \Delta y)$.

Etant donnée une sortie spécifique y_l , pour chaque paire d'échantillons (X_i, y_{il}) et (X_j, y_{jl}) notée (i, j) , la variation des données d'entrée et la variation des données de sortie, notées respectivement Δx_{ij} et Δy_{ij} , sont calculées par la formule suivante :

$$\Delta x_{ij} = \sqrt{\sum_{p \in \{1, \dots, m\}} (x_{ip} - x_{jp})^2} \quad (2-8)$$

$$\text{Et} \quad \Delta y_{ij} = |y_i - y_j| \quad (2-9)$$

Lorsqu'on procède au retrait d'une variable x_k de l'ensemble des variables d'entrée, la variation des données d'entrée est calculée comme suit :

$$\Delta x_{ij}^k = \sqrt{\sum_{\substack{p \in \{1, \dots, m\} \\ p \neq k}} (x_{ip} - x_{jp})^2} \quad (2-10)$$

Après élimination de x_k , la variation de la sensibilité floue de la paire (i, j) par rapport à la sortie y_l , notée $\Delta S_{ij}^{k,l}$, est calculée comme suit :

$$\Delta S_{ij}^{k,l} = |FL(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}) - FL(\Delta x_{ij}^k, \Delta y_{ij})| \quad (2-11)$$

Si on considère tous les paires des échantillons, la variation de la sensibilité floue après le retrait de x_k est donnée par la formule suivante:

$$\Delta S_{k,l} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Delta S_{ij}^{k,l} \quad (2-12)$$

où $\gamma = n(n-1)/2$ est le nombre total de paires des échantillons.

La valeur de $\Delta S_{k,l}$ est normalisée sur l'intervalle $[0, 1]$. De cette manière, plus la valeur de $\Delta S_{k,l}$ est proche de 1, plus la variable correspondante x_k est sensible à la sortie y_l . Plus la valeur de $\Delta S_{k,l}$ est proche de 0, plus la variable x_k est moins sensible à la sortie y_l .

En utilisant le critère de variation de sensibilité floue $\Delta S_{k,l}$, nous proposons un algorithme récurrent afin de sélectionner les paramètres les plus pertinents et ordonner toutes les variables d'entrée. Cet algorithme combine la Recherche Séquentielle en Avant et la Recherche Séquentielle en Arrière. La première procédure permet de sélectionner le paramètre le plus pertinent à chaque étape tandis que la seconde permet de retirer le paramètre le moins pertinent ainsi que les paramètres corrélés avec le paramètre le plus pertinent. Le paramètre le plus pertinent correspond au paramètre ayant la plus grande valeur de sensibilité et le paramètre le moins pertinent correspond au cas de la plus faible sensibilité. De cette manière, nous obtenons un classement pour l'ensemble des paramètres d'entrée du procédé. Le principe de cet algorithme est illustré comme suit :

Entrées : un ensemble de variable d'entrée $X = \{x_1, \dots, x_k, \dots, x_m\}$ et une sortie spécifique y_l .

Sortie : une liste ordonnée de variables d'entrée pertinentes X_r et les valeurs correspondant du critère de sensibilité floue.

corr(x_i, x_k): corrélation entre x_i et x_k

1) Initialiser $X' = X$, $X_r = \{\}$, $\Delta S'_l = \{\}$

2) Tant que $X' \neq \emptyset$

Calculer la variation de sensibilité floue des éléments de X' par rapport à la sortie y_l

$\Delta S'_l = \{\Delta S_{1,l}, \dots, \Delta S_{k,l}, \dots, \Delta S_{taille(X'),l}\}$

$X_r = X_r \cup \{x_i\}$, $X' = X' \setminus \{x_i\}$ où $\Delta S_{i,l} = \max(\Delta S'_l)$

$X' = X' \setminus \{x_j, x_k\}$ où $\Delta S_{j,l} = \min(\Delta S'_l)$ et $\text{corr}(x_i, x_k) \geq 0,8$

Fin

Afin de valider l'efficacité de cet algorithme, il sera appliqué dans le Chapitre 4 dans le but de sélectionner les paramètres pertinents du procédé plasma.

2.4 Conclusion

Comme nous les avons présentés, les systèmes flous sont basés sur des ensembles de règles floues énoncées par des experts qui prennent en considération les connaissances existantes dans le domaine. Ils permettent de faire le lien entre modélisation numérique et modélisation symbolique, ce qui a permis des développements industriels spectaculaires à partir d'algorithmes très simple de traduction de connaissance symbolique en entité

numérique et inversement. La théorie des ensembles flous a également eu un impact sur les techniques de classification automatiques, et a contribué à un certain renouvellement des approches existantes de l'aide à la décision.

Contrairement aux systèmes flous, les réseaux de neurones sont entraînés plutôt que programmés. Ils constituent une famille de fonctions non linéaires paramétrées qui tente de simuler les mécanismes de traitement de l'information ayant lieu dans le cerveau humain. Du fait de leur forte non linéarité et de l'aspect de généralisation qu'ils présentent, les réseaux de neurones sont de bons outils pour modéliser la relation entre plusieurs variables, à partir de données expérimentales, sous réserve que celles-ci soient suffisamment nombreuses et représentatives. Ils sont appliqués, avec succès, dans de nombreux domaines notamment pour la modélisation de systèmes complexes et la synthèse de lois de commande.

Cependant, le succès d'un problème de modélisation est fortement lié à la qualité des variables qui les caractérisent. En effet, dans la majorité des cas, ces variables ne sont pas toutes aussi informatives ; elles peuvent correspondre à du bruit, être peu significative, corrélées ou non pertinentes pour la tâche à réaliser. Ainsi, il est indispensable de sélectionner les variables pertinentes à utiliser dans le modèle. Cette sélection a pour objectif de réduire la dimension de l'espace de données et d'améliorer la performance du modèle tout en rehaussant son interprétabilité. Dans ce cadre, de nombreuses méthodes de sélection ont été développées et utilisées dans la littérature. Notre choix s'est portée sur la méthode utilisant le critère de sensibilité flou car il a été démontré que ce critère est robuste et efficace. Il a notamment pour avantage de mieux filtrer le bruit sur les données mesurées.

Chapitre 3 : Matériel et méthodes expérimentales

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les différentes méthodes que nous allons utiliser pour caractériser les matériaux textiles à traiter. Ensuite, nous décrirons la machine plasma que nous allons utiliser pour réaliser les traitements plasma. Enfin, nous présenterons la méthode que nous allons utiliser pour caractériser la modification de surface par plasma. Les données d'apprentissage obtenues seront analysées dans le chapitre suivant afin de mettre en évidence les modifications apportées par plasma. De même, une étude de sélection de paramètres va être menée afin de déterminer les paramètres les plus pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma en vue d'extraire de la connaissance sur ce procédé et d'en simplifier la modélisation.

3.1 Présentation des matériaux

Pour cette étude, nous avons utilisé des tissus en fibres de polyester et de viscose. La fibre de polyester est la fibre synthétique la plus produite dans le monde et la plus couramment utilisée dans l'industrie textile (voir annexe A). En dépit de ses propriétés fondamentales telles que la ténacité, la résistance à l'abrasion et au froissement, cette fibre présente l'inconvénient d'un très faible pouvoir absorbant et d'une très faible énergie de surface. D'autre part, la fibre de viscose est une fibre cellulosique régénérée qui présente en particulier des propriétés proches de celles de coton (voir annexe B). D'autant, elle est moins chère à produire que les fibres naturelles et plus facile à teindre. La viscose constitue donc une alternative très valable au coton. Cependant, la plupart de ses applications telle que le médical recommande une haute rétention d'eau et des liquides. Ainsi, pour augmenter l'énergie de surface de ces matériaux, nous avons choisi de les traiter par plasma atmosphérique sous air puisqu'il a déjà été démontré que ce type de traitement augmente grandement l'énergie de surface des polymères et des textiles [LEROUX, 2006], [BORCIA, 2006], [PICHAL, 2007], [KARAHAN, 2008], [FERREIRA, 2008], [TAKKE, 2009], [YAMAN, 2009].

Lors de cette étude, nous nous intéressons également à étudier l'influence de la structure textile sur les résultats du traitement par plasma. C'est pour cette raison que nous avons choisi de varier quelques caractéristiques des tissus tels que le type des fibres, la finesse des fibres, la densité de la matière, la porosité et la construction de l'armure. Au total, nous avons utilisé huit tissus dont quatre sont en fibres de polyester, deux en micro-polyester et deux en fibres de viscose. Cependant, le traitement plasma est très sensible à la présence d'impuretés dans la structure textile vu qu'elles pourraient nuire à l'atteinte des résultats. Pour éliminer ces impuretés, les tissus ont été nettoyés par un lavage à l'eau chaude (85°C) pendant 2 heures, suivi de trois rinçages à l'eau froide. Ensuite, ils ont été séchés à l'air ambiant pendant environ une semaine avant d'être placés dans une étuve à 30-35 °C pendant 24 h.

3.1.1 Détermination des caractéristiques des tissus

Nous nous intéressons dans cette partie à déterminer les caractéristiques des tissus que nous avons utilisés dans notre étude. Avant la conduite des essais, les éprouvettes ont été séjournées dans une atmosphère normale de conditionnement et des essais des textiles (température : 20 ± 2 °c ; humidité relative : 65 ± 2 %).

3.1.1.1 Détermination de l'armure de tissu

L'armure désigne le mode d'entrecroisement des fils de chaîne (sens longitudinal) et de fils de trame (sens transversal). On appelle rapport d'armure le nombre de fils de chaîne et de trame nécessaires pour la production de l'armure : c'est la plus petite configuration du tissu ; autrement dit, le plus motif se répétant dans un tissu. Les trois armures fondamentales sont *la toile*, *le sergé* et *le satin*, toutes les autres en sont dérivées (Tableau 3-1).

Pour déterminer l'armure de tissu, nous avons utilisé la méthode décrite par la norme NF G 07-104 (partie I) [AFNOR, 1975]. Le principe de cette méthode consiste, tout d'abord, à effiloche une partie de tissu, de dimensions suffisantes pour contenir plusieurs fois le rapport d'armure, sur deux bords perpendiculaires jusqu'à l'obtention sur chacun de ses bords d'une frange d'environ 1 cm de largeur. Ensuite, à l'aide d'une aiguille à détisser, faire glisser quelques fils parallèles à l'un des bords effilochés pour le repérage des pris. Après, continuer éventuellement à dégager de nouveaux fils de tissu, en rejetant au fur et à mesure les fils déjà examinés jusqu'à ce que, en retrouvant une répétition de la même disposition des fils de chaîne et de trame, on constate que le rapport d'armure a été complètement obtenu.

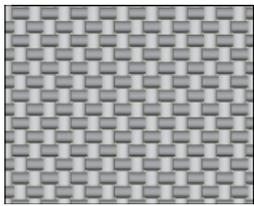
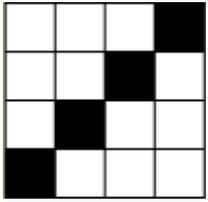
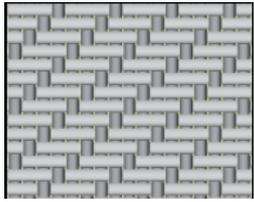
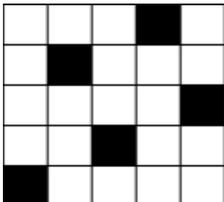
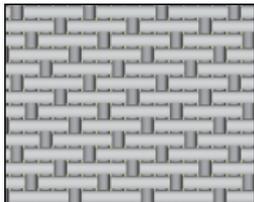
Armure	Dessin	Exemple d'images	Description
Toile			Chaque duitte passe alternativement sous et sur un fil de chaîne avec un décalage sur la rangée suivante. Ce tissage donne un tissu uni, semblable sur les deux faces.
Sergé (1/3)			Chaque duitte passe successivement au-dessus de trois fils de chaîne et au-dessous d'un seul fil. Sur l'endroit du tissu ainsi tissé, des côtes saillantes montent en oblique de gauche à droite.
Satin			Chaque duitte passe sous et sur les fils de chaîne selon un rythme différent de l'armature sergé et le fil de trame dissimile presque tous les fils de chaîne. L'aspect est lisse, brillant sur l'endroit, mat sur l'envers.

Tableau 3- 1 : Les armures fondamentales

3.1.1.2 Détermination du nombre de fils de chaîne et de duites

Il s'agit de compter le nombre de fils de chaînes ou de duites occupant une longueur bien déterminée, puis de calculer le nombre de fils par unité de longueur.

En général, un tissu est plus au moins « serré ». On traduit ce taux de serrage par deux grandeurs qui définissent la « contexture » ;

- Le compte en chaîne : c'est le nombre de fils de chaîne par centimètre de tissu (le centimètre étant mesuré suivant le sens trame).
- Le duitage : c'est le nombre de fils de trame par centimètre de tissu (le centimètre étant mesuré suivant le sens chaîne).

La méthode que nous avons utilisée consiste à détisser les bords de l'éprouvette conditionnée de manière à lui conserver une longueur convenable pour le comptage puis à extraire, au moyen d'une aiguille à détisser, les fils de l'éprouvette ainsi préparée en le comptant. Ce test a été réalisé sur cinq essais dans chaque sens (chaîne et trame).

3.1.1.3 Détermination de la masse surfacique

Il s'agit de déterminer la masse d'une éprouvette de surface connue, amenée soit à l'équilibre dans l'atmosphère normale d'essais textiles soit à l'état anhydre.

La méthode que nous avons utilisée consiste à mesurer la masse au mètre carré en atmosphère normale d'un tissu. Comme préconisé par la norme NF G07-150 [AFNOR, 1984], nous avons utilisé un emporte pièce de forme circulaire pour découper dix éprouvettes ayant 100 cm² de surface. La masse en grammes par mètre carré, pour chaque éprouvette, a été déterminée selon l'Equation (3-1).

$$M_s = m \times \frac{10\,000}{s} \quad (3-1)$$

où M_s est la masse surfacique (en g/m²), m la masse d'une éprouvette exprimée (en g) et s la surface de la même éprouvette (en cm²).

3.1.1.4 Détermination de la finesse des fibres

La finesse d'une structure linéaire textile (fibre élémentaire, mono-filament, fil multi-filamentaire,...) est exprimée par l'intermédiaire de son titre, qui représente sa masse par unité de longueur. Selon le système international d'unités, l'unité de la masse linéique est le « Tex ». Celui-ci correspond à la masse en gramme par kilomètre de matière (Equation 3-2).

Il est à noter la possibilité d'utiliser des multiples ou des sous-multiples du système considéré (Titre en millitex, en décitex, en kilotex, ...).

$$\text{Titre (tex)} = 1000 \times \frac{\text{Masse (g)}}{\text{Longueur (m)}} \quad (3-2)$$

Dans notre cas, nous avons réalisé les mesures de finesse des fibres sur un appareil de type Vibroskop de Zweigle (Figure 3-1), selon la norme NF G07-306. Le principe de la mesure consiste à charger la fibre d'un poids à son niveau inférieur et de la suspendre dans l'appareil. On lui soumet ainsi des pulsations électriques d'une fréquence constante, pour la mettre en vibration. Il est possible de varier la longueur de vibration pour aboutir à l'amplitude maximale (résonance). Lorsque ce point est atteint, le résultat se lit sur l'échelle graduée correspondant au contreponds utilisé.



Figure 3- 1: Appareil Vibroskop (Zweigle)

3.1.1.5 Détermination de l'embuvage des fils extrait d'un tissu

L'embuvage ou le retrait d'un fil est la différence entre la longueur d'un fil, respectivement de chaîne ou de trame, extrait d'un tissu et la longueur que ce même fil occupait dans le tissu. Il s'exprime en pourcentage de la longueur occupée par le fil dans le tissu.

Pour déterminer ce paramètre, nous avons utilisé la méthode décrite par la norme NF G 07- 104 (partie IV) [AFNOR, 1975]. Cette méthode consiste à retirer avec précaution, à l'aide d'une aiguille à détisser, de la bandelette de tissu, par le milieu, un groupe de 10 fils, en laissant chaque extrémité de fil dans des pinces de l'appareil, en contrôlant soigneusement la longueur de fil prise entre pince et en faisant coïncider l'extrémité avec le repère de la pince. Ensuite, il s'agit d'appliquer progressivement la force de rectification juste suffisante pour la

disparition des ondulations d'un fil, sans provoquer un allongement sensible de ce dernier. Enfin, on fait une lecture de la longueur du fil sous tension. L'embuvage des fils extraits de tissu est déterminé selon l'Equation 3-3.

$$E_v = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100 \quad (3-3)$$

où E_v est l'embuvage (en %), l la longueur moyenne du fil tendu (en mm), l_0 la longueur que le fil occupait dans le tissu (en mm).

N.B : La détermination de ce paramètre va nous servir pour déterminer le titre des fils de chaîne et de trame.

3.1.1.6 Détermination de la masse linéique (titre) des fils de chaîne et des fils de trame extrait d'un tissu

Pour déterminer ce paramètre, nous avons utilisé la méthode décrite par la norme NF G 07-104 (partie V) [AFNOR, 1975]. Le principe de cette méthode consiste, tout d'abord, à retirer successivement, dans le sens chaîne d'une part et dans le sens trame d'autre part, dix fils de chaque éprouvette et les ajouter aux fils qui ont servi à la mesure de l'embuvage de manière à obtenir une longueur minimale de fils de 10 m. Ensuite, placer ces fils dans des vases à peser préalablement tarés. Puis, les conditionner dans l'atmosphère normale de conditionnement et d'essai des textiles et, enfin, déterminer la masse des éprouvettes. La masse linéique est obtenue en divisant la masse des fils par la longueur moyenne obtenue lors de la mesure de l'embuvage.

3.1.1.7 Détermination de l'épaisseur

Nous avons réalisé la mesure de l'épaisseur sur un appareil SODEMAT (Figure 3-2), selon la norme NF G07-153 [AFNOR, 1996]. Cet appareil est équipé d'une sonde électronique qui permet de déterminer l'épaisseur du tissu avec une précision de 0,01 mm. La mesure s'effectue à l'aide d'un capteur électromagnétique qui permet de mesurer la distance entre la surface plane sur laquelle est déposée l'éprouvette et une feuille d'aluminium placée au-dessus de celle-ci, avant la masse. La masse que nous avons utilisée permet d'exercer une pression de 0,5 kPa sur l'éprouvette.



Figure 3- 2 : Appareil SODEMAT

3.1.1.8 Détermination de la perméabilité à l'air

Nos mesures de perméabilité à l'air ont été réalisées sur le FX3300 perméabilimètre à l'air de TEXTEST (Figure 3-3) sous une pression de 196 Pa, selon la norme NF G07-111 [AFNOR, 1995]. Le principe de fonctionnement de cet appareil consiste à mesurer le taux et le volume d'air qui circule à travers un tissu sous un différentiel de pression à la surface sous le manomètre. L'appareil est utilisé rapidement, simplement et avec une grande précision de la perméabilité de l'air sur des supports plats de tout genre allant des tissus serrés ou enduits aux feutres pour papier très ouverts.



Figure 3- 3 : Appareil TEXTEST FX3300

3.1.1.9 Détermination de la rugosité

Nous avons réalisé les mesures de rugosité sur un profilomètre optique (Cotec, Altisurf 500) (Figure 3-4). Le principe de fonctionnement de cet appareil est le suivant ; un faisceau lumineux (lumière blanche) passe à travers une lentille à forte aberration chromatique, qui décompose le faisceau lumineux en ondes monochromatiques sur une certaine distance (300

μm). En fonction du relief de la surface analysée, certaines longueurs d'ondes vont être réfléchies. Ces dernières vont être interprétées en termes d'altitude. Puis, les données acquises sont traitées par un logiciel (Altimap) permettant de caractériser l'état de la surface, calculer les paramètres normalisés 2D et 3D, mesurer des distances, hauteurs, angles, évaluer les volumes des creux ou des pics, et représenter la surface en 2D et 3D suivant divers modes. Parmi les paramètres statistiques standards les plus utiles, nous retiendrons les suivants ;

- Sa , rugosité en r , est la moyenne arithmétique des écarts à la moyenne (\bar{r}) et se calcule par la formule (3-4):

$$Sa = \frac{1}{NM} \sum_{\theta_r=0}^{N-1} \sum_{z=0}^{M-1} |r_{\theta_r,z} - \bar{r}| \quad (3-4)$$

Sa exprime la rugosité en prenant en compte toutes les aspérités en r (pics et vallées), en chaque point (θ_r, z) du maillage de la surface.

- Sds , densité des pics, correspond au nombre de pics par mm^2 étudié. Un point est considéré comme sommet s'il est plus haut que ses 8 voisins. Ce paramètre dépend donc du pas de mesure, utilisé pour balayer la surface étudiée. Dans notre cas, le pas utilisé est de $5 \mu\text{m}$.

Notons bien que, pour chaque tissu, la mesure de la rugosité a été réalisée sur cinq essais.



Figure 3- 4 : Profilomètre optique (Cotec, Altisurf 500)

3.1.1.10 Détermination de la porosité

La porosité est le rapport de volume des vides du matériau divisé par le volume total. Elle s'exprime le plus souvent en pourcentage (%). En général, on distingue pour tout matériau

poreux deux types de porosité : une porosité ouverte et une porosité fermée. Le premier type regroupe les pores dont le volume est accessible depuis l'extérieur de l'échantillon. Le second type regroupe les pores qui sont clos et non connectés entre eux. La somme de ces deux porosités constitue la porosité totale. Toutefois, en ce qui concerne le textile, la porosité fermée est considérée nulle (on néglige les rares cas où la présence de fibres creuses induit une porosité fermée non nulle). La porosité totale des textiles peut s'étendre jusqu'à à 95 % où plus dans certains cas. Cette très forte porosité rend compte du fait que les fibres ne sont pas disposées de façon très dense et qu'elles ne sont pas uniformes que se soit par leur taille ou par leur forme.

Dans notre cas, la porosité a été calculée en fonction de la masse surfacique, de l'épaisseur et de la densité de l'échantillon considéré selon l'Equation (3-5).

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_s}{\rho_s e_p} \quad (3-5)$$

où ε est la porosité (en %), M_s la masse surfacique de l'échantillon (en g/m^2), e_p l'épaisseur de l'échantillon (en m) et ρ_s la densité des fibres constituant l'échantillon (en g/m^3).

3.1.1.11 Détermination de la surface totale des fibres

La surface totale des fibres représente la surface occupée par les fibres par unité de surface du matériau textile. Elle représente entre autre la surface totale offerte au traitement.

Dans notre cas, la surface totale des fibres a été calculée en fonction de la masse surfacique, de la finesse et de la densité de fibres selon l'Equation (3-6).

$$St = \frac{2M_s}{\rho_s D} \quad (3-6)$$

où St est la surface totale des fibres (en m^2/m^2) et D le diamètre des fibres (en μm).

Le diamètre des fibres a été déterminé grâce au microscope optique.

Le Tableau 3-2 regroupe les caractéristiques des tissus que nous avons étudiés.

La Figure 3-5 montre des exemples d'images des tissus observées au microscope optique avec un agrandissement de x10.

Tissu Paramètre	At1	At2	At3	As	Bt	Bs	Et	Es	CV(%)
Matière	100% polyester	100% polyester	100% polyester	100% polyester	100% polyester	100% polyester	100% viscose	100% viscose	-
Type des fibres	fibres standards	fibres standards	fibres standards	fibres standards	microfibres	microfibres	fibres standards	fibres standards	-
Armure	toile	toile	toile	sergé de 3	toile	sergé de 3	toile	sergé de 3	-
Finesse des fils de chaîne (dtex)	362 (9,29)	925 (33,54)	309 (4,71)	362 (5,36)	351 (8,92)	351 (2,74)	341 (3,71)	341 (4,73)	49,22
Finesse des fils de trame (dtex)	167 (2,73)	925 (29,11)	293 (6,13)	335 (5,2)	150 (0)	300 (2,64)	340 (0,48)	340 (2,12)	67,88
Finesse des fibres (dtex)	1,7 (0,0354)	1,7 (0,0252)	1,7 (0,0473)	1,7 (0,0270)	0,9 (0,0195)	0,9 (0,0152)	1,3 (0,0224)	1,3 (0,0239)	26,37
Masse surfacique (g/m ²)	160 (1,56)	275,5 (4,09)	119 (2,32)	200 (2,4)	170 (0,88)	195 (1,96)	180 (2,38)	190 (1,31)	23,80
Epaisseur (mm) sous 0,5 kPa	0,32 (0,0069)	0,60 (0,0057)	0,385 (0,0053)	0,38 (0,008)	0,31 (0,0075)	0,37 (0,0086)	0,38 (0,0052)	0,41 (0,0075)	22,73
Perméabilité à l'air (l/m ² s) sous 196 kPa	55 (2,358)	346 (4,55)	3315 (51,56)	104 (2,67)	20 (0,702)	49 (1,135)	786 (25,024)	673 (43,05)	166,05
Duitage (duites/cm)	17,2 (0,4472)	13 (0)	14 (0)	21 (0)	18,6 (0,8944)	21 (0)	17 (0)	21 (0)	17,69
Compte chaîne (fils/cm)	39,2 (0,4472)	13,6 (0,2041)	24 (0)	40 (0)	39,4 (0,5477)	41,6 (0,5477)	42,2 (0,4472)	45 (0)	30,64
Porosité(%)	63,8 (0,43)	66,7 (0,18)	77,2 (0,13)	61,9 (0,35)	60,6 (0,75)	62,1 (0,50)	68,8 (0,01)	69,5 (0,35)	8,47
Rugosité (µm- pas=5µm)	57,9 (1,61)	55,4 (1,48)	53,1 (2,72)	51,6 (2,64)	56,7 (2,45)	41,9 (1,18)	74,4 (1,06)	68,6 (3,37)	17,57
Densité des pics (pics/mm ² - pas=5µm)	2307 (37,20)	1557 (62,52)	995 (11,13)	1750 (40,14)	1888 (35,33)	1991 (67,67)	1303 (29,34)	1413 (38,26)	25,38
Surface totale des fibres (m ² /m ²)	37 (0,02)	63,8 (0,28)	27,7 (0,32)	46,3 (0,19)	53,9 (0,30)	61,8 (0,10)	45,4 (0,21)	47,9 (0,11)	25,13

(.) : Ecart type.

Tableau 3- 2 : Caractéristiques des différents tissus

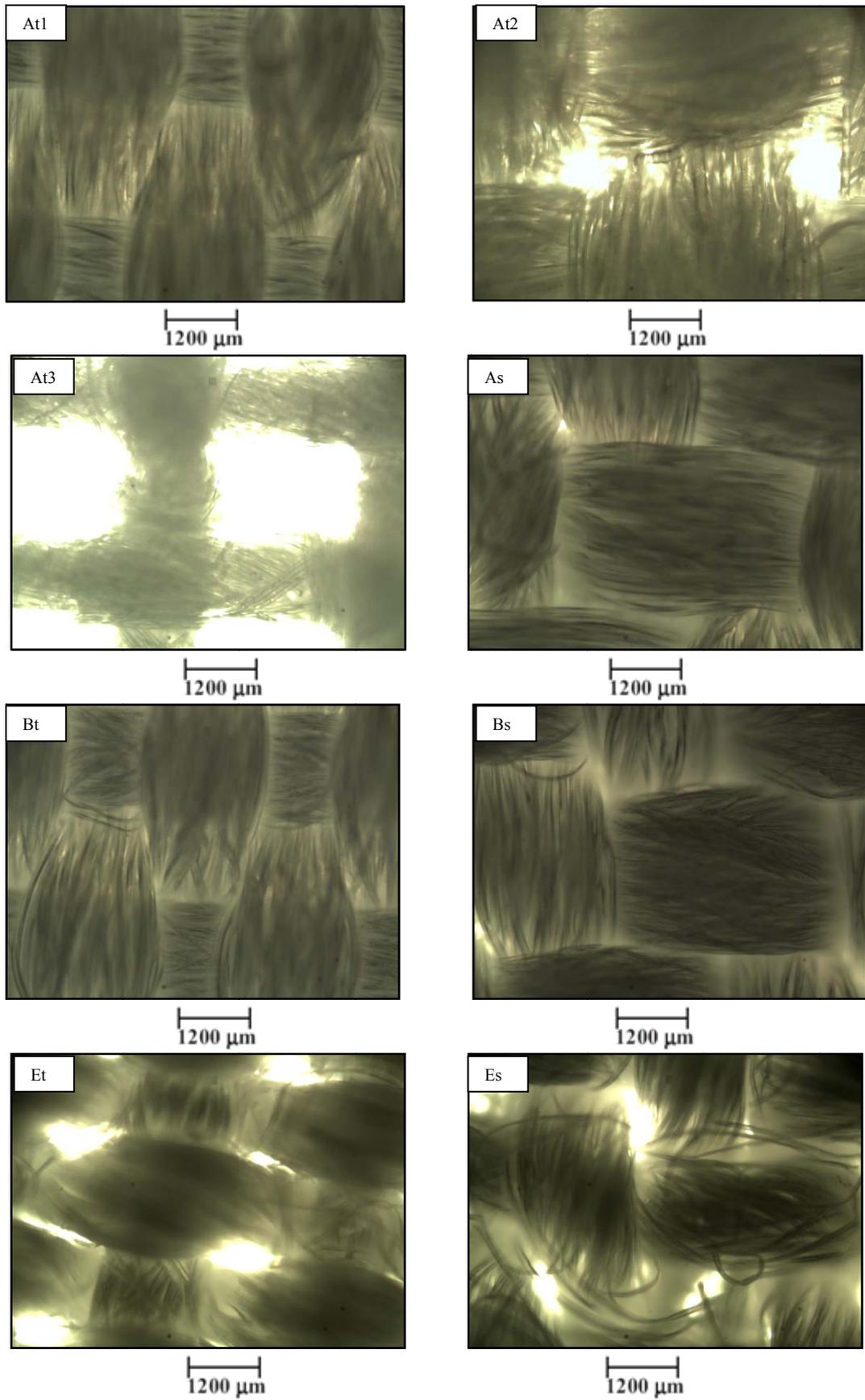


Figure 3- 5 : Images des différents tissus obtenues par microscopie optique (agrandissement x10)

3.1.2 Préparation des échantillons

Tout d'abord, la mesure tensiométrique par la méthode de Wilhelmy a été utilisée pour tester la propreté des tissus lavés. L'appareil est une balance qui va mesurer la force de mouillage à l'interface lame platine/liquide (Figures 3-6 et 3-7). Avant chaque mesure, la lame de platine a été nettoyée par un passage sous la flamme afin d'assurer sa propreté. Le périmètre en contact étant connu, cette force est directement retranscrite en énergie de surface (en mN/m) par le tensiomètre [LEROUX, 2007]. La propreté des tissus a été vérifiée en mesurant la tension de surface de l'eau du dernier rinçage qui demeure constante (au alentour de 72,6 mN/m) et correspond bien à celle de l'eau pure. Après séchage, les échantillons ont été repassés et assemblés par couture de manière à former un petit rouleau puisque la machine plasma à utiliser permet un traitement en continu de la matière. Enfin, ils ont été conditionnés dans une atmosphère normale de conditionnement (20 ± 2 °C, 65 ± 2 % RH) préalablement au traitement plasma.



Figure 3- 6 : Tensiomètre

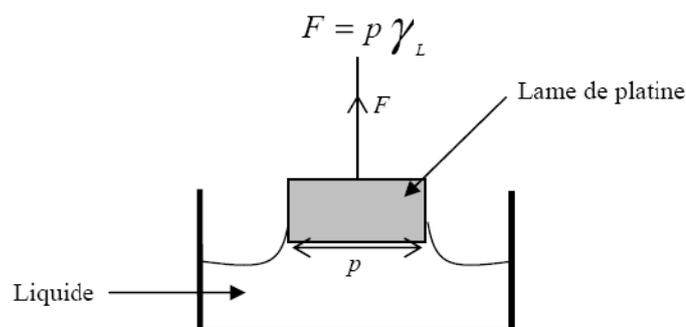


Figure 3- 7 : Représentation d'une mesure de la tension de surface par la méthode de Wilhelmy

3.2 Présentation de la machine plasma

Les traitements par plasma à pression atmosphérique ont été réalisés, au laboratoire GEMTEX, sur une machine dénommée « Coating Star » manufacturée par « AHLBRANDT SYSTEM » (voir Figure 3-8 et Figure 3-9). Cette machine est de type hybride Corona/ Décharges à Barrière Diélectrique (DBD). La décharge est générée entre deux électrodes métalliques, alimentées en courant alternatif et une contre électrode cylindrique permettant le passage en continu de la matière. Ces deux électrodes sont recouvertes d'un matériel diélectrique qui est la céramique. Elles permettent une répartition plus homogène du courant les traversant et donc la création d'un plasma homogène à pression atmosphérique. Les électrodes ont une longueur de 0,5 m et une largeur de 1,5 cm. La contre électrode a une longueur de 0,5 m et un diamètre de 0,3 m. La distance entre les électrodes et la contre électrode est de 1,5 mm. Le système fonctionne avec une fréquence électrique de 30 kHz et une tension de 15 kV. Les paramètres pouvant varier sont la puissance électrique (de 300 à 1000 W) et la vitesse de défilement de l'échantillon sous les électrodes (de 2 à 10 m/min). De ces paramètres, on peut calculer un paramètre appelé puissance de traitement (TP) qui est exprimé en kJ/m^2 (Equation (3-7)).

$$TP = \left(\frac{P_e}{LV} \right) \times 0,06 \quad (3-7)$$

où P_e est la puissance électrique (en W), L est la longueur des électrodes (en m) et V est la vitesse de traitement (en m/min).

Dans notre cas, nous avons utilisé l'air ambiant comme gaz plasmagène. Cependant, d'autres gaz peuvent être utilisés. L'avantage de notre système de traitement, outre le fait que l'on puisse modifier le gaz de traitement est que l'on peut effectuer une pulvérisation grâce à des nébuliseurs de produit chimique au niveau de l'électrode (Figure 3-9) afin qu'une fois la surface du matériau activée par plasma on puisse faire réagir divers produits. Par contre, il est important de noter que cette machine ne traite qu'une face de textile à la fois puisque la face plaquée sur la contre- électrode n'est pas en contact avec le plasma.

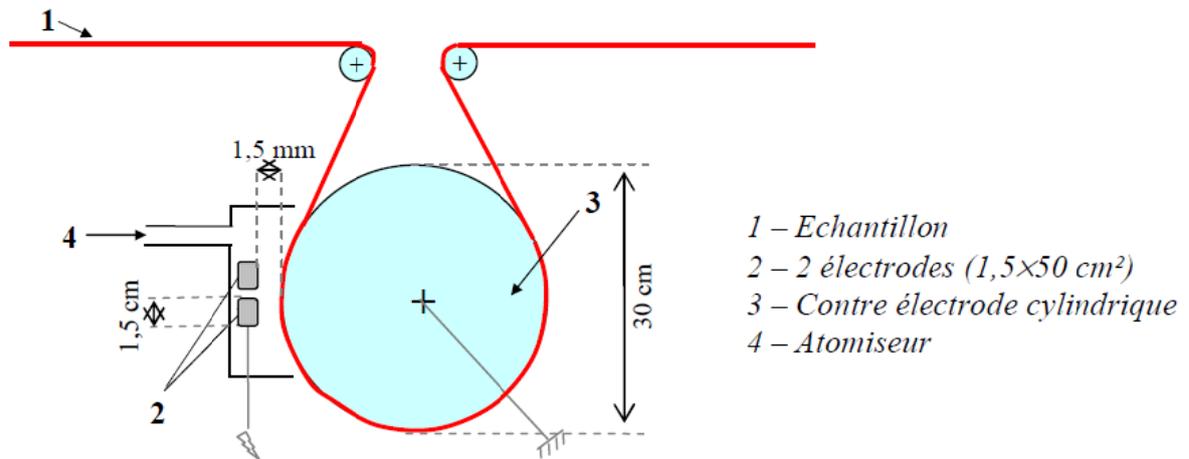


Figure 3- 8 : Schématisation de la machine de traitement plasma

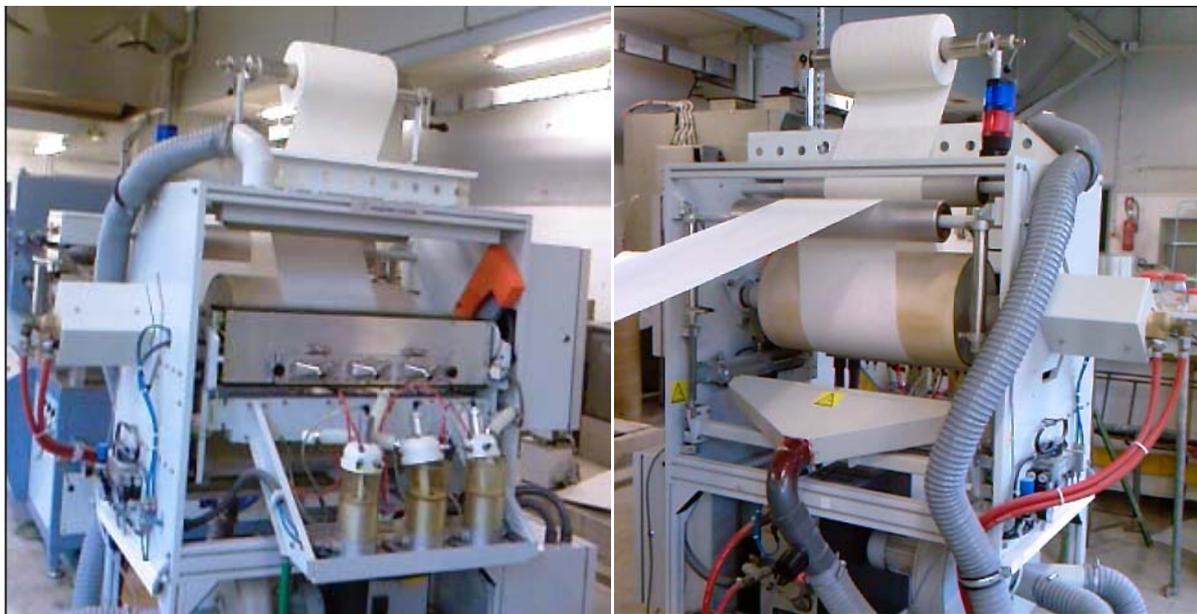


Figure 3- 9 : La machine plasma « Coating Star » (AHLBRANDT SYSTEM)

3.3 Méthode d'analyse de surface

Ici il n'est pas possible d'utiliser la méthode de la goutte posée (voir annexe C) pour caractériser la modification de surface de tissus par plasma. En effet, les tissus sont des structures textiles qui ont une surface fortement hétérogène vu qu'elle est composée d'une succession de sections de fibres et de pores. De ce fait, si une goutte de liquide est déposée sur cette surface, elle sera absorbée par capillarité très rapidement ce qui rend la mesure délicate. Il faut donc utiliser une autre méthode afin de déterminer d'une manière pertinente l'énergie de surface des textiles.

Nous allons utiliser la « BALANCE 3S » de chez GBX (Figure 3-10) qui nous permettra de mesurer l'angle de contact entre un liquide et l'échantillon mais aussi d'obtenir une estimation de la capillarité.

L'appareil permet de mesurer la variation de masse de l'échantillon à analyser en fonction du temps. La mesure s'effectue en suspendant un échantillon de taille 3 cm sur 5 cm au fléau de la balance. En dessous de celui-ci est placé un récipient contenant le liquide (eau déminéralisée). Lors de démarrage de la manipulation, le récipient est monté automatiquement jusqu'à ce que la tranche de l'échantillon entre en contact avec la surface de liquide. La montée de récipient est bloquée à ce niveau lorsque l'appareil détecte une variation de masse de l'échantillon (formation du ménisque).

Nous avons fixé arbitrairement le temps de mesure à 2 minutes afin de pouvoir observer outre le phénomène de mouillage, le phénomène de capillarité. Une fois la mesure terminée, le récipient contenant le liquide redescend jusqu'à cassure du ménisque obtenue entre l'échantillon et le liquide (Figure 3-11).



Figure 3- 10 : La « BALANCE 3S »

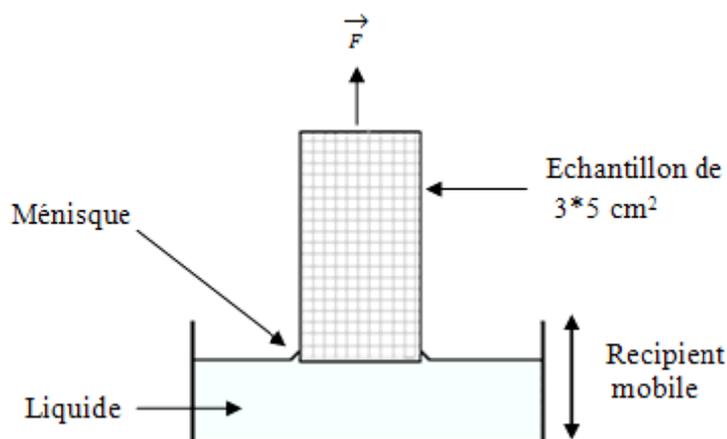


Figure 3- 11 : Schématisation du fonctionnement de la « BALANCE 3S »

Le logiciel trace un suivi de la variation de la masse de liquide au contact avec l'échantillon en fonction du temps. La courbe obtenue ressemble à la Figure 3-12. Elle peut être divisée en deux parties bien distinctes.

- 1^{er} partie : il y a une brusque augmentation de la masse mesurée. Cette augmentation est due à l'entrée en contact de l'échantillon et de la surface de liquide. Il y a donc formation d'un ménisque plus ou moins important suivant l'angle de contact. On atteint donc rapidement une valeur correspondant à la masse du ménisque (M_m).
- 2^{ième} partie : l'augmentation de la masse mesurée devient de plus en plus faible. Ceci correspond à la masse de liquide montant dans l'échantillon par capillarité. A la fin des 2 minutes, on obtient pour le dernier point de la courbe la masse totale (M_t).

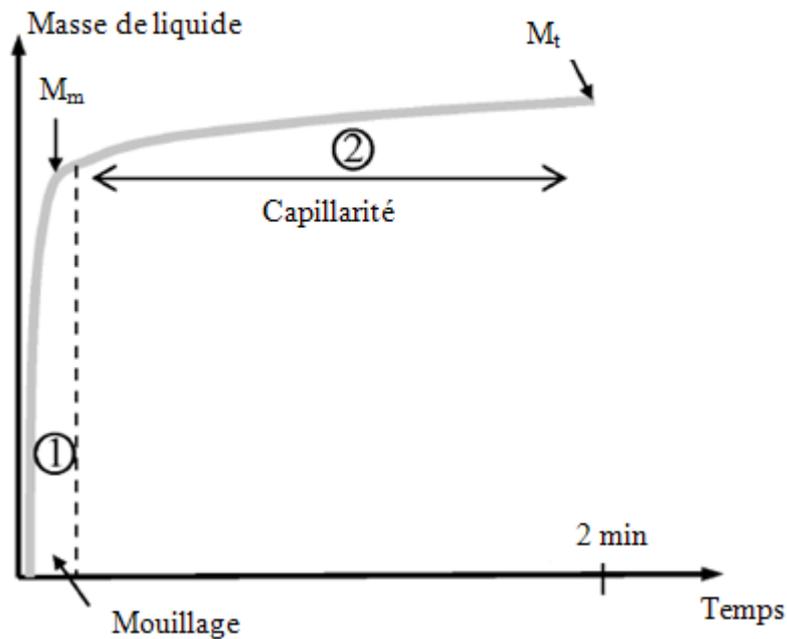


Figure 3- 12 : Courbe théorique du mouillage

La masse capillaire finale (M_c) correspond à la masse de liquide absorbée par capillarité par l'échantillon pendant son temps de contact avec le liquide. Cette valeur est donnée par la balance à la fin de mesure lorsque l'échantillon est retiré de la surface de liquide. La masse de ménisque est obtenue grâce à l'Equation (3-8)

$$M_m = M_t - M_c \quad (3-8)$$

Une fois la masse de ménisque est déterminée, il est possible d'en déduire le cosinus de l'angle de contact entre le liquide et l'échantillon (Equation (3-9)).

$$F = M_m g = \gamma_L p \cos \theta \quad (3-9)$$

où $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, γ_L est la tension de surface du liquide (en mN/m), θ l'angle de contact (en °) et p le périmètre équivalent en contact (en mm).

Le périmètre p a été déterminé en utilisant l'heptane comme liquide mouillant. En faisant l'hypothèse que l'on a un mouillage total de surface des fibres avec l'heptane ($\cos \theta = 1$), il est possible de calculer le périmètre de chaque échantillon grâce à l'équation suivante :

$$p = \frac{M_m g}{\gamma_L} \quad (3-10)$$

La tension de surface γ_L de l'heptane vaut 20,14 mN/m.

Grâce à la masse capillaire (M_c) présente dans l'échantillon, la hauteur capillaire peut être déduite à l'aide de l'Equation (3-11)

$$M_c = \rho_l h \varepsilon S \quad (3-11)$$

où h est la hauteur capillaire qui correspond à la progression capillaire verticale de liquide dans l'échantillon de tissu (en mm), S la section droite du milieu poreux (en mm^2), ε la porosité de l'échantillon (en %) et ρ_l la masse volumique de liquide (en g/cm^3).

3.4 Conclusion

Dans cette étude, des méthodes expérimentales normalisées ont été introduites pour déterminer certaines caractéristiques des tissus utilisés. Les traitements par plasma ont été réalisés sous air en utilisant une décharge contrôlée par barrière diélectrique. La modification de la surface des tissus a été caractérisée par une méthode tensiométrique utilisant une balance de type 3S. Les résultats seront exposés et analysés dans le chapitre suivant. On s'intéresse également dans ce chapitre à sélectionner les paramètres les plus pertinents qui ont une influence sur les résultats du traitement plasma.

Chapitre 4 : Etude de l'influence de la structure textile sur le traitement par plasma atmosphérique

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les résultats de fonctionnalisation des différents tissus en polyester (PET), micro-polyester et viscose par un traitement plasma sous air à pression atmosphérique. Ensuite, nous exposerons la méthodologie suivie pour sélectionner les paramètres pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma, en utilisant le critère de sensibilité flou. Enfin, nous proposerons une analyse et discussion des résultats obtenus.

4.1 Fonctionnalisation des tissus par plasma

Pour cette étude, nous avons utilisé huit tissus dont quatre sont en fibres de PET (At1, At2, At3, As), deux en micro-PET (Bt, Bs) et deux en fibres de viscose (Et, Es). Les caractéristiques de ces tissus ont été présentées dans le Tableau 3-2 (*Chap 3 - Tableau 3-2*).

Ces différents tissus ont été traités, sur une seule face, par un plasma atmosphérique de type décharges à barrière diélectrique utilisant l'air ambiant comme gaz plasmagène à différentes puissances électriques: 300, 500, 700 et 1000 W. Pour chacune de ces puissances, la vitesse de défilement de tissu sous les électrodes a été modifiée. Les vitesses choisies sont de 2, 5, 7 et 10 m/min. Le fait qui correspond à une puissance de traitement (TP) variable entre 0 (cas non traité) et 60 kJ/m². Les modifications des propriétés de mouillage des tissus ont été suivies en fonction de TP. Pour chaque TP, cinq échantillons par tissu ont été mesurés et la valeur moyenne a fait l'objet de l'étude.

4.1.1 Etude de l'oxydation des tissus de PET

4.1.1.1 Mouillabilité

Les mesures de la mouillabilité des tissus de PET ont été effectuées par tensiométrie (*Chap 3 - § 3.3*). Lors de cette manipulation, nous avons pu remarquer que malgré le fait que nous trempions les échantillons dans l'eau distillée, la valeur de la tension de surface de cette eau ne variait pas et ce, quelle que soit la puissance de traitement. Nous avons donc constaté qu'il n'y a pas des couches de faible cohésion (c.-à-d. des oligomères) à la surface des fibres de PET car dans le cas contraire la tension de surface de l'eau aurait diminué. On a donc l'angle réel entre la fibre de polyester et l'eau. Les résultats obtenus sont regroupés sur la Figure 4-1 ci-dessous.

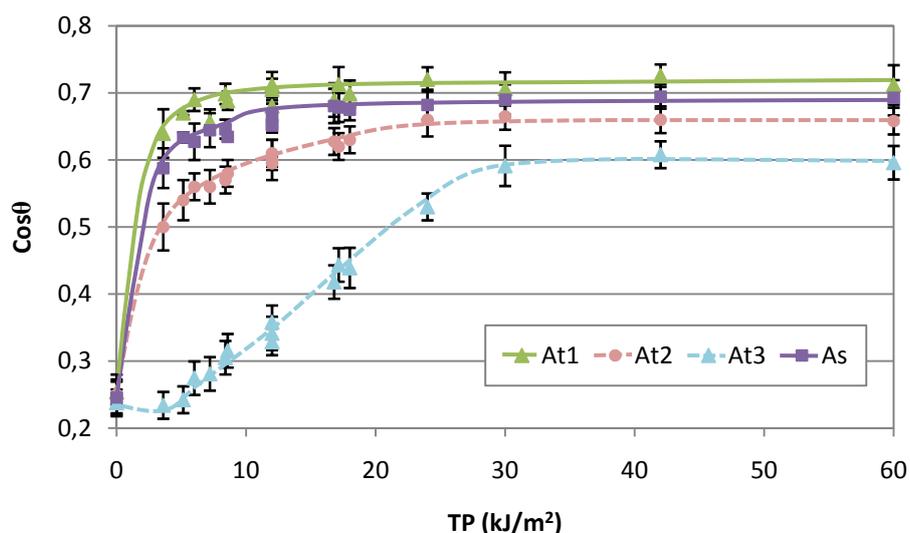


Figure 4- 1 : Evolution du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de PET en fonction de la puissance de traitement plasma

D'après cette figure, nous pouvons remarquer qu'il y a augmentation de la mouillabilité des tissus de PET après le traitement plasma. L'énergie de surface de polyester a donc été augmentée considérablement pour arriver à ces résultats. Ceci démontre bien qu'il y a eu une modification de la surface polymérique lors du traitement plasma et plus précisément une oxydation par les espèces réactives du plasma tels que les ions, les électrons, les radicaux libres et les radiations UV (UltraViolet). Si nous prenons en compte le mécanisme de modification de PET proposé dans la littérature (*Chap 1 - Figures 14a et b*), les coupures de chaînes et les oxydations par plasma ont principalement lieu au niveau des fonctions esters.

Pour tous les tissus, nous pouvons constater que le cosinus de l'angle de contact augmente plus ou moins rapidement jusqu'à atteindre une sorte de plateau limite qui semble être la valeur maximale du cosinus de l'angle de contact pouvant être atteinte avec ce type de traitement. Les écarts types moyens (incertitudes) observés lors de ces mesures sont faibles. Les traitements peuvent donc être considérés comme homogènes et reproductibles. Le Tableau 4-1 liste les valeurs minimale et maximale du cosinus de l'angle de contact ($\cos\theta$) de l'eau à la surface de chaque tissu de PET ainsi que la valeur de la pente de la courbe et la puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale du $\cos\theta$.

Tissu \ $\cos\theta$	Valeur minimale (cas non traité)	Valeur maximale	Valeur de la pente	TP correspondant à 95 % de $\cos\theta$ maximale (kJ/m^2)
At1	0,2537	0,7256	0,1071	≈ 12
At2	0,25	0,67	0,0694	≈ 18
At3	0,24	0,61	0,0146	≈ 24
As	0,2458	0,6946	0,095	≈ 12

Tableau 4- 1 : Valeurs minimale et maximale du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface de chaque tissu de PET, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale du $\cos\theta$

En outre, nous pouvons remarquer que le tissu At3 présente un comportement différent de ce qui a été observé sur les tissus At1, At2 et As (Figure 4-1). En effet, la courbe du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface de ce tissu montre une tendance négative pour les plus petites puissances de traitement (TP). Ceci indique que le liquide ne mouille pas les fibres et ainsi le traitement à des très faibles TP semble ne pas être efficace dans ce cas. Il faut au minimum une puissance de traitement de 24 kJ/m^2 pour que le cosinus de l'angle de contact atteigne 95 % de sa valeur maximale. Ainsi, le tissu At3 a besoin d'une puissance de traitement plus importante pour que sa surface soit oxydée par les espèces réactives du plasma.

4.1.1.2 Capillarité

Puisque le support traité est de tissu, on peut déterminer un autre paramètre lié à la mouillabilité qui est la hauteur capillaire. Ce paramètre a été calculé à partir de la masse capillaire mesurée par le tensiomètre (*Chap 3 - § 3.3*). La masse capillaire correspond à la masse d'eau distillée absorbée par la tranche de l'échantillon ($2 \times 3 \text{ cm}$) pendant 2 minutes. La Figure 4-2 ci-dessous montre l'évolution de la hauteur capillaire des différents tissus de PET en fonction de la puissance de traitement.

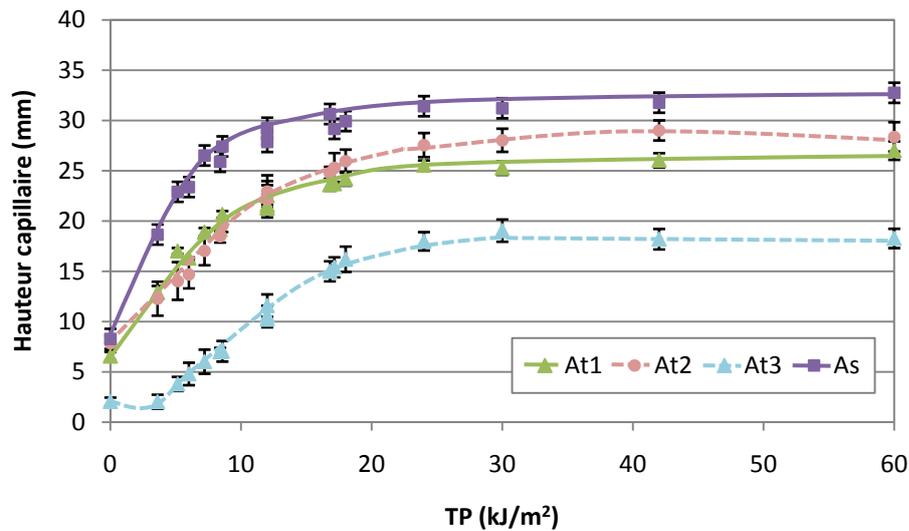


Figure 4- 2 : Evolution de la hauteur capillaire des tissus de PET en fonction de la puissance de traitement plasma

Nous pouvons remarquer que la hauteur capillaire de chaque tissu augmente progressivement avec la puissance de traitement. Cette augmentation de la capillarité suit l'augmentation de cosinus de l'angle de contact. Donc les traitements par plasma n'affectent pas seulement les fibres présentes en surface mais aussi les fibres présentes à l'intérieur de tissu. Ainsi, le test de capillarité va permettre de caractériser la qualité du traitement en terme de répartition entre la surface du textile et le cœur du matériau. Le Tableau 4-2 regroupe les valeurs minimale et maximale de la hauteur capillaire (H_{cap}) de chaque tissu de PET ainsi que la valeur de la pente de la courbe et la valeur du TP correspondant à 95 % de la valeur maximale de H_{cap} . Nous pouvons constater dans tous les cas que les traitements par plasma ont amélioré le pouvoir capillaire des tissus de PET envers l'eau distillée. Cependant, nous pouvons noter que le tissu As offre une augmentation de capillarité plus importante que celle des autres tissus.

Tissu \ H_{cap}	Valeur minimale (mm)	Valeur maximale (mm)	Valeur de la pente	TP correspondant à 95 % de H_{cap} maximale (kJ/m^2)
At1	6,563	27,01	1,7684	≈ 30
At2	8	29	1,2572	≈ 24
At3	2,05	19,05	0,8501	≈ 24
As	8,286	32,76	2,8489	≈ 30

Tableau 4- 2: Valeurs minimale et maximale de la hauteur capillaire de chaque tissu de PET, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale de H_{cap}

Par ailleurs, contrairement au cosinus de l'angle de contact avec l'eau distillée, nous remarquons qu'il faut une puissance de traitement plus importante pour les tissus At1, At2 et As pour que la capillarité atteigne 95 % de sa valeur maximale. Ceci peut s'expliquer par le fait que pour une bonne capillarité, il faut que les fibres présentes à l'intérieur du matériau soient traitées et non uniquement celles présentes en surface. Il faut donc traiter à une TP élevée pour obtenir un traitement des fibres présentes en surfaces ainsi que celles présentes à l'intérieur. Pour le tissu At3 par contre, les puissances de traitement nécessaires pour atteindre 95 % de la valeur maximale de la mouillabilité et de la capillarité sont identiques. Ainsi, nous pouvons conclure que l'oxydation des fibres présentes à l'intérieur des tissus At1, At2 et As a nécessité une TP plus importante que celle d'activation des fibres présentes en surface. Cependant, le traitement d'oxydation de l'ensemble des fibres de tissu At3 semble être homogène.

4.1.2 Etude de l'oxydation des tissus de micro-PET

4.1.2.1 Mouillabilité

Après les traitements par plasma, il y a augmentation considérable du cosinus de l'angle de contact entre les tissus de micro-PET et l'eau distillée sans création de couches de faible cohésion (Figure 4-3). Cette amélioration de la mouillabilité peut être attribuée à l'introduction de groupements polaires de type carbonyles, carboxyles et hydroxyles à la surface des microfibrilles de polyester [LEROUX, 2007], [GEYTER, 2006]. Pour chaque tissu, la

courbe représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact en fonction de TP présente trois régions distinctes: une première région où l'amélioration de la mouillabilité est plus remarquable même à des faibles TP, suivi d'une seconde région où le cosinus de l'angle de contact augmente lentement jusqu'à atteindre un palier. Ce résultat indique que les espèces réactives du plasma ont une énergie suffisante, même à des faibles TP, pour activer et modifier la surface des tissus en micro-PET [JELIL, 2009a].

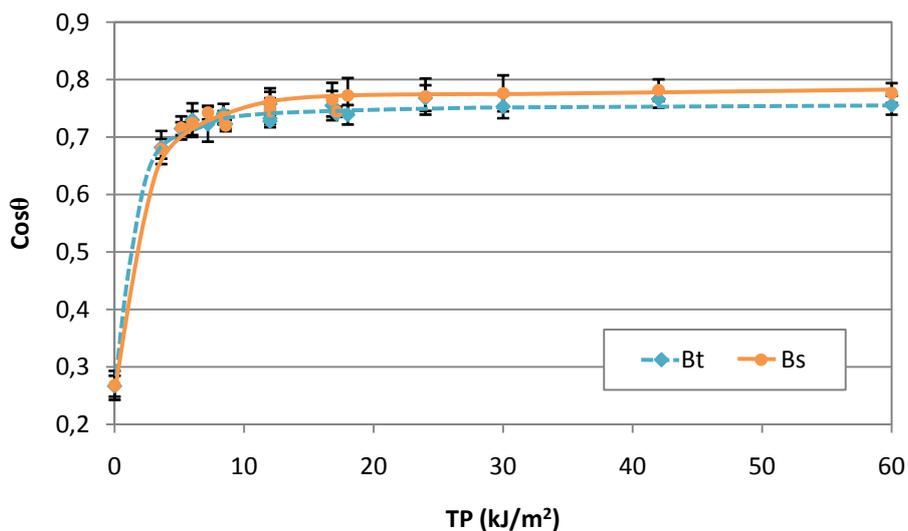


Figure 4- 3 : Evolution du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de micro-PET en fonction de la puissance de traitement plasma

Les traitements peuvent être considérés comme homogènes et reproductibles puisque les écarts types moyens observés lors de ces mesures sont faibles. Le Tableau 4-3 regroupe les valeurs minimale et maximale du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface de chaque tissu de micro-PET ainsi que la valeur de la pente de la courbe et la valeur du TP correspondant à 95 % de la valeur maximale du $\cos\theta$.

Tissu \ $\cos\theta$	Valeur minimale (cas non traité)	Valeur maximale	Valeur de la pente	TP correspondant à 95 % de $\cos\theta$ maximale (kJ/m ²)
Bt	0,2667	0,7679	0,1154	≈ 12
Bs	0,268	0,7817	0,1143	≈ 12

Tableau 4- 3 : Valeurs minimale et maximale du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface de chaque tissu de micro-PET, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale du $\cos\theta$

D'après ce tableau, nous pouvons remarquer après traitement que la mouillabilité est très légèrement plus élevée pour le tissu Bs que pour le tissu Bt.

4.1.2.2 Capillarité

Après les traitements par plasma, il y a augmentation du pouvoir capillaire des tissus de micro-PET envers l'eau distillée (Figure 4-4). L'augmentation mesurée de la capillarité est due à l'étalement de liquide à la surface des fibres. En effet, le plasma en oxydant la surface des fibres, augmente l'affinité de celle-ci avec le liquide. Nous pouvons noter aussi que, contrairement au cosinus de l'angle de contact, il faut une puissance de traitement plus importante (environ 60 kJ/m^2) pour arriver à la capillarité maximale. Ainsi dans ce cas, l'oxydation des fibres à l'intérieur des tissus a nécessité une TP plus importante que celle de l'activation des fibres présentes en surface.

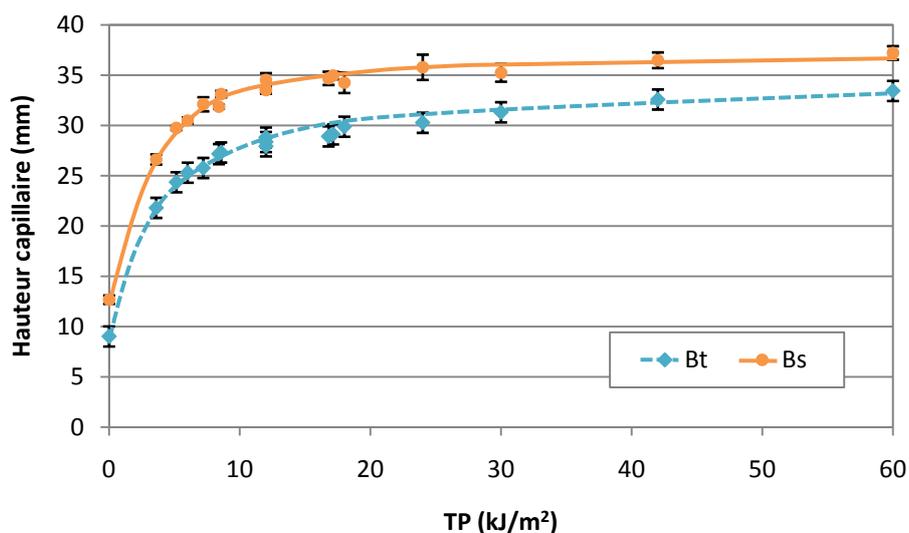


Figure 4- 4 : Evolution de la hauteur capillaire des tissus de micro-PET en fonction de la puissance de traitement plasma

Le Tableau 4-4 regroupe les valeurs minimale et maximale de la hauteur capillaire de chaque tissu de micro-PET ainsi que la valeur de la pente de la courbe et la valeur du TP correspondant à 95 % de la valeur maximale de H_{cap} . Nous pouvons remarquer après traitement que la hauteur capillaire de tissu Bs est plus importante que celle de tissu Bt.

Tissu \ H_{cap}	Valeur minimale (cas non traité) (mm)	Valeur maximale (mm)	Valeur de la pente	TP correspondant à 95 % de H_{cap} maximale (kJ/m^2)
Bt	9,029	33,44	3,0826	≈ 30
Bs	12,686	37,22	3,4172	≈ 30

Tableau 4- 4 : Valeurs minimale et maximale de la hauteur capillaire de chaque tissu de micro-PET, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale de H_{cap}

4.1.3 Etude de l'oxydation des tissus de viscose

4.1.3.1 Mouillabilité

Comme pour les tissus de PET et micro-PET, les tissus de viscose ont été traités par plasma sur une seule face et nous avons suivi les modifications de leurs propriétés de mouillage en fonction de la puissance de traitement (TP).

Après traitement, il y a augmentation du cosinus de l'angle de contact entre les tissus de viscose et l'eau distillée sans création de couches de faible cohésion (Figure 4-5). Ceci démontre bien qu'une oxydation de la surface des tissus a lieu lors du traitement plasma.

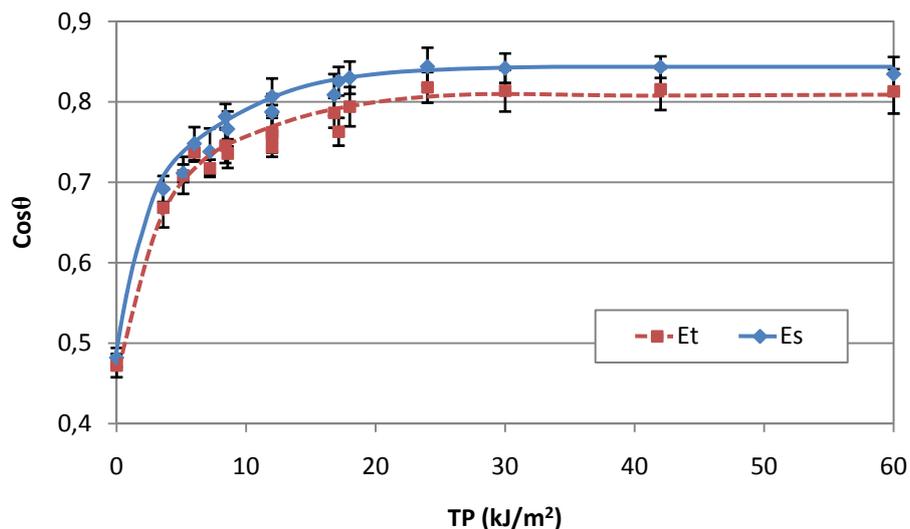


Figure 4- 5 : Evolution du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de viscose en fonction de la puissance de traitement plasma

Les écarts types moyens observés lors de ces mesures sont faibles. Ainsi, les traitements peuvent être considérés comme homogènes et reproductibles. Le Tableau 4-5 regroupe les valeurs minimale et maximale du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface de chaque tissu de viscose ainsi que la valeur de la pente de la courbe et la valeur du TP correspondant à 95 % de la valeur maximale du $\cos\theta$.

Tissu \ $\cos\theta$	Valeur minimale (cas non traité)	Valeur maximale	Valeur de la pente	TP correspondant à 95 % de $\cos\theta$ maximale (kJ/m^2)
Et	0,4722	0,818	0,0545	≈ 18
Es	0,482	0,84	0,0583	≈ 18

Tableau 4- 5 : Valeurs minimale et maximale du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de viscose, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale du $\cos\theta$

D'après ce Tableau, nous pouvons remarquer que la mouillabilité est légèrement plus élevée pour le tissu Es que pour le tissu Et. Cependant, ces deux tissus ont nécessité une même TP de 18 kJ/m^2 environ pour que le cosinus de l'angle de contact atteigne 95 % de sa valeur maximale.

4.1.3.2 Capillarité

Après les traitements par plasma il y a augmentation du pouvoir capillaire des tissus de viscose envers l'eau distillée (Figure 4-6). Ceci indique que les fibres présentes à l'intérieur de ces tissus sont oxydées par les espèces réactives du plasma. Nous pouvons remarquer que pour des valeurs des TP inférieures à 42 kJ/m^2 , la hauteur capillaire augmente progressivement. A partir de 42 kJ/m^2 , la hauteur capillaire des tissus diminue légèrement. Comme pour les tissus de PET et micro-PET, nous constatons que la puissance de traitement des fibres à l'intérieur des tissus de viscose est supérieure à celle de l'oxydation des fibres présentes en surface.

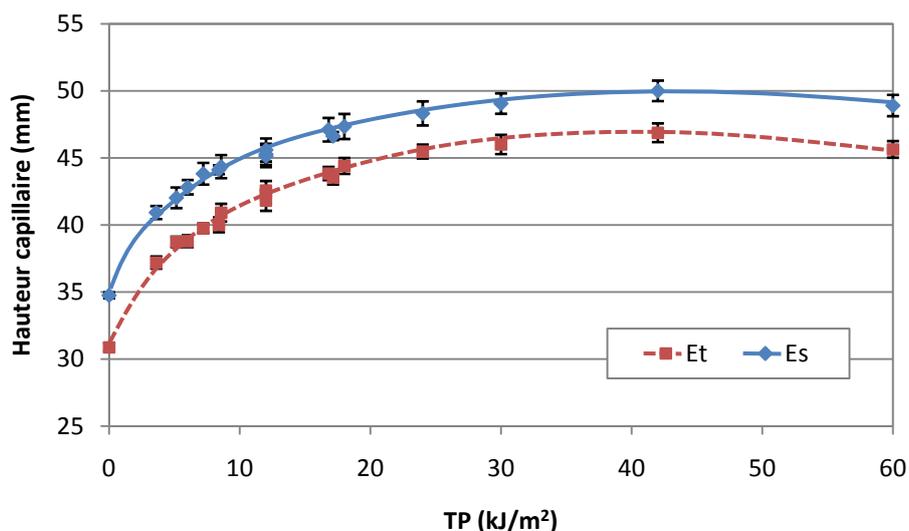


Figure 4- 6 : Evolution de la hauteur capillaire des tissus de viscose en fonction de la puissance de traitement plasma

Le Tableau 4-6 regroupe les valeurs minimale et maximale de la hauteur capillaire de chaque tissu de viscose ainsi que la valeur de la pente de la courbe et la valeur du TP correspondant à 95 % de la valeur maximale de H_{cap} . Nous pouvons remarquer après traitement que la hauteur capillaire est plus élevée pour le tissu Es que pour le tissu Et.

Tissu \ H_{cap}	Valeur minimale (cas non traité) (mm)	Valeur maximale (mm)	Valeur de la pente	TP correspondant à 95 % de H_{cap} maximale (kJ/m ²)
Et	30,876	46,68	1,3875	24
Es	34,753	50,00	1,3632	24

Tableau 4- 6 : Valeurs minimale et maximale de la hauteur capillaire de chaque tissu de viscose, valeur de la pente de la courbe et puissance de traitement (TP) correspondant à 95 % de la valeur maximale de H_{cap}

Notons bien que dans ce travail, nous n'avons pas suivi le phénomène de vieillissement après traitement plasma. Cependant, dans la littérature il y a de nombreux travaux qui ont étudié ce phénomène. Dans ce cadre, Leroux et al. [LEROUX, 2007] en utilisant un plasma de type décharges à barrière diélectrique sous air comme la notre, ont montré que le traitement d'un tissu de polyester garde une bonne stabilité. En effet, ils ont constaté que même après un mois de vieillissement à l'air ambiant, il n'y a qu'une légère diminution du

taux d'oxygène en surface. Le même type de résultat a été observé par Pichal et al. [PICHAL, 2006], [PICHAL, 2007] en traitant des tissus de polyester par un plasma atmosphérique sous air. En fait, ils ont remarqué que les modifications apportées restent stables après 13 jours de vieillissement. Kabajev et al. [KABAJEV, 2004] ont remarqué aussi que la capillarité d'un tissu de polyester traité par un plasma à pression réduite sous air garde une bonne stabilité après un mois de vieillissement.

Par ailleurs, des autres études ont montré qu'il y a une diminution de l'énergie de surface lors du vieillissement après le traitement par plasma. A titre d'exemple, Morent et al. [MORENT, 2007] en traitant des non-tissés en poly(éthylène téréphtalate) par un plasma de type décharges à barrière diélectrique à une pression de 5 kPa sous air, argon et hélium, ont remarqué que le traitement sous air donne un vieillissement beaucoup moins stable que les autres gaz. Ils ont attribué la diminution de l'énergie de surface à la réorientation des nouveaux groupes hydrophiles vers l'intérieur du polymère. Takke et al. [TAKKE, 2009] ont également observé que le vieillissement à l'air ambiant d'un tissu de polyester traité par plasma atmosphérique sous air provoque une augmentation de l'angle de contact. Ils ont attribué ce résultat au retournement des chaînes moléculaires ainsi qu'aux post-réactions des sites actifs avec l'air ambiant.

Dans cette première partie, les manipulations par mouillage ont permis de mettre en évidence les modifications de surface engendrées par le traitement plasma sur des tissus en PET, micro-PET et viscose, en se basant sur leur comportement vis-à-vis de l'eau distillée. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a une nette amélioration de la mouillabilité et du pouvoir capillaire des différents tissus. Dans la partie suivante, nous allons déterminer les paramètres les plus pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma relatifs à chaque paramètre de sortie. Cette étude va permettre d'une part d'extraire de la connaissance sur le procédé, et d'autre part d'en simplifier la modélisation.

4.2 Sélection des paramètres pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma

Pour cette étude, nous avons présélectionné 14 paramètres des tissus et 2 paramètres du procédé plasma afin d'étudier leurs possibilités d'influence sur les modifications de surface

apportées par plasma. Le Tableau 4-7 liste l'ensemble de ces paramètres ainsi que leurs désignations.

Paramètres	Désignations
Paramètres du procédé plasma (entrée)	<p><u>Caractéristiques des tissus:</u> matière (x_1), armure (x_2), finesse des fibres (x_3), masse surfacique (x_4), épaisseur (x_5), duitage (x_6), compte chaîne (x_7), finesse des fils de chaîne (x_8), finesse des fils de trame (x_9), perméabilité à l'air (x_{10}), rugosité (x_{11}), densité des pics (x_{12}), porosité (x_{13}), surface totale des fibres (x_{14})</p> <p><u>Paramètres du plasma:</u> puissance électrique (x_{15}), vitesse de traitement (x_{16})</p>
Propriétés de surface (sortie)	cosinus de l'angle de contact (y_1), hauteur capillaire (y_2)

Tableau 4- 7 : Paramètres d'entrée et de sortie du procédé plasma

Le Tableau 4-8 nous renseigne sur les coefficients de corrélation entre les différents paramètres d'entrée et de sortie. Nous pouvons noter qu'il existe une forte corrélation entre :

- ✓ La matière et la rugosité,
- ✓ L'armure et le duitage,
- ✓ La finesse des fils de chaîne, la finesse des fils de trame, la masse surfacique et l'épaisseur,
- ✓ La masse surfacique et la surface totale des fibres,
- ✓ La perméabilité à l'air et la porosité,
- ✓ Le duitage et le compte chaîne,
- ✓ La porosité et la densité des pics.

Il est donc important d'identifier les paramètres d'entrée les plus pertinents afin de faciliter l'interprétation des résultats. Pour se faire, nous allons utiliser le critère de sensibilité flou et appliquer l'algorithme récurrent présenté dans le Chapitre 2 (*Chap2 - § 2.3.3*). Cet algorithme va nous permettre de sélectionner les paramètres d'entrée les plus pertinents et éliminer ceux qui sont moins pertinents ou qui sont corrélés avec les paramètres pertinents. Cependant, avant d'appliquer cette méthode de sélection, nous allons tout d'abord présenter la méthodologie suivie.

En examinant les courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire des différents tissus en fonction de TP, nous avons mis en évidence, pour chaque courbe, trois zones distinctes qui peuvent être assimilées à des droites (Figures 4-7 et 4-8). La première zone correspond à une TP comprise entre 0 et 6-9 kJ/m² (6-15 % de l'échelle des abscisses). Dans cette zone, la variation du cosinus de l'angle de contact (respectivement de la hauteur capillaire) en fonction de TP est la plus importante pour les tissus At1, At2, As, Bt, Bs, Et et Es. Par contre, pour le tissu At3, il n'y a plus de variation. La deuxième zone correspond à une TP comprise entre 6-9 et 24 kJ/m² (40 % de l'échelle des abscisses). Dans cette zone, la variation du cosinus de l'angle de contact (respectivement de la hauteur capillaire) en fonction de TP est la plus importante pour le tissu At3, mais, elle est aussi importante pour les autres tissus. La troisième zone correspond à la partie restante de la courbe. Cette fois-ci, la variation de cosinus de l'angle de contact (respectivement de la hauteur capillaire) en fonction de TP est peu importante pour les différents tissus.

En se basant sur ces courbes, nous avons choisi de mener deux études différentes pour déterminer les paramètres pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma : une étude « locale » dans laquelle nous allons étudier les différentes courbes zone par zone afin de déterminer les paramètres pertinents relatifs à chaque zone, et une étude « globale » dans laquelle nous allons utiliser la totalité des points de chaque courbe pour analyser l'influence globale des paramètres. La comparaison des résultats issus de ces analyses locale et globale va nous permettre de mettre en évidence l'impact des paramètres d'entrée sur la variabilité des sorties.

Chapitre 4 Etude de l'influence de la structure textile sur le traitement par plasma atmosphérique

	Matière	Armure	Finesse des fils de chaîne	Finesse des fils de trame	Finesse des fibres	Masse surfacique	Epaisseur	Perméabilité à l'air	Duitage	Compte chaîne	Porosité	Rugosité	Surface totale des fibres	Densité des pics	Puissance électrique	Vitesse de traitement	Cosinus de l'angle de contact	Hauteur capillaire
Matière	1,0000																	
Armure	0,1491	1,0000																
Finesse des fils de chaîne	-0,2301	-0,2669	1,0000															
Finesse des fils de trame	-0,0412	-0,1072	0,9390	1,0000														
Finesse des fibres	-0,1741	-0,2335	0,3279	0,3712	1,0000													
Masse surfacique	-0,0166	0,1645	0,8463	0,8336	0,0624	1,0000												
Epaisseur	0,0043	-0,0712	0,9098	0,9920	0,3887	0,7924	1,0000											
Perméabilité à l'air	0,0341	-0,2933	-0,1952	-0,0302	0,3505	-0,5631	0,0441	1,0000										
Duitage	0,2247	0,8259	-0,5750	-0,5287	-0,5154	-0,0830	-0,5230	-0,5105	1,0000									
Compte chaîne	0,4511	0,4990	-0,7782	-0,7540	-0,5236	-0,3647	-0,7539	-0,3967	0,8649	1,0000								
Porosité	0,3083	-0,2773	-0,0497	0,1503	0,4181	-0,3795	0,2369	0,9261	-0,5433	-0,3941	1,0000							
Rugosité	0,8598	-0,2810	-0,0920	-0,0154	0,0722	-0,0547	0,0074	0,0568	-0,0943	0,2481	0,3123	1,0000						
Surface totale des fibres	-0,0676	0,2769	0,5670	0,5107	-0,4926	0,8234	0,4599	-0,6818	0,1999	-0,0778	-0,6033	-0,2390	1,0000					
Densité des pics	-0,4289	0,1210	-0,0159	-0,2764	-0,2053	0,1548	-0,3435	-0,7902	0,3874	0,3365	-0,8470	-0,3690	0,3150	1,0000				
Puissance électrique	-5,31E-17	1,28E-16	4,78E-18	1,63E-18	3,36E-17	-1,11E-17	-1,67E-17	1,70E-17	-2,72E-17	1,13E-17	-4,37E-18	3,17E-17	2,27E-17	8,16E-18	1,0000			
Vitesse de traitement	6,80E-17	3,63E-17	-2,75E-17	4,27E-17	-2,18E-17	2,23E-17	-2,69E-18	-8,15E-18	-5,31E-17	5,50E-17	0	2,63E-18	1,63E-17	-1,17E-17	0,2258	1,0000		
Cosinus de l'angle de contact	0,3955	0,2801	-0,1287	-0,1582	-0,4471	0,2046	-0,1794	-0,4810	0,3031	0,3483	-0,4520	0,2580	0,3679	0,3381	0,4119	-0,2642	1,0000	
Hauteur capillaire	0,6440	0,4257	-0,2048	-0,0916	-0,4628	0,1907	-0,0815	-0,3914	0,3554	0,4134	-0,1851	0,4070	0,3171	-0,1318	0,2981	-0,1723	0,6785	1,0000

Tableau 4- 8 : Corrélations entre les variables d'entrée et de sortie du procédé plasma

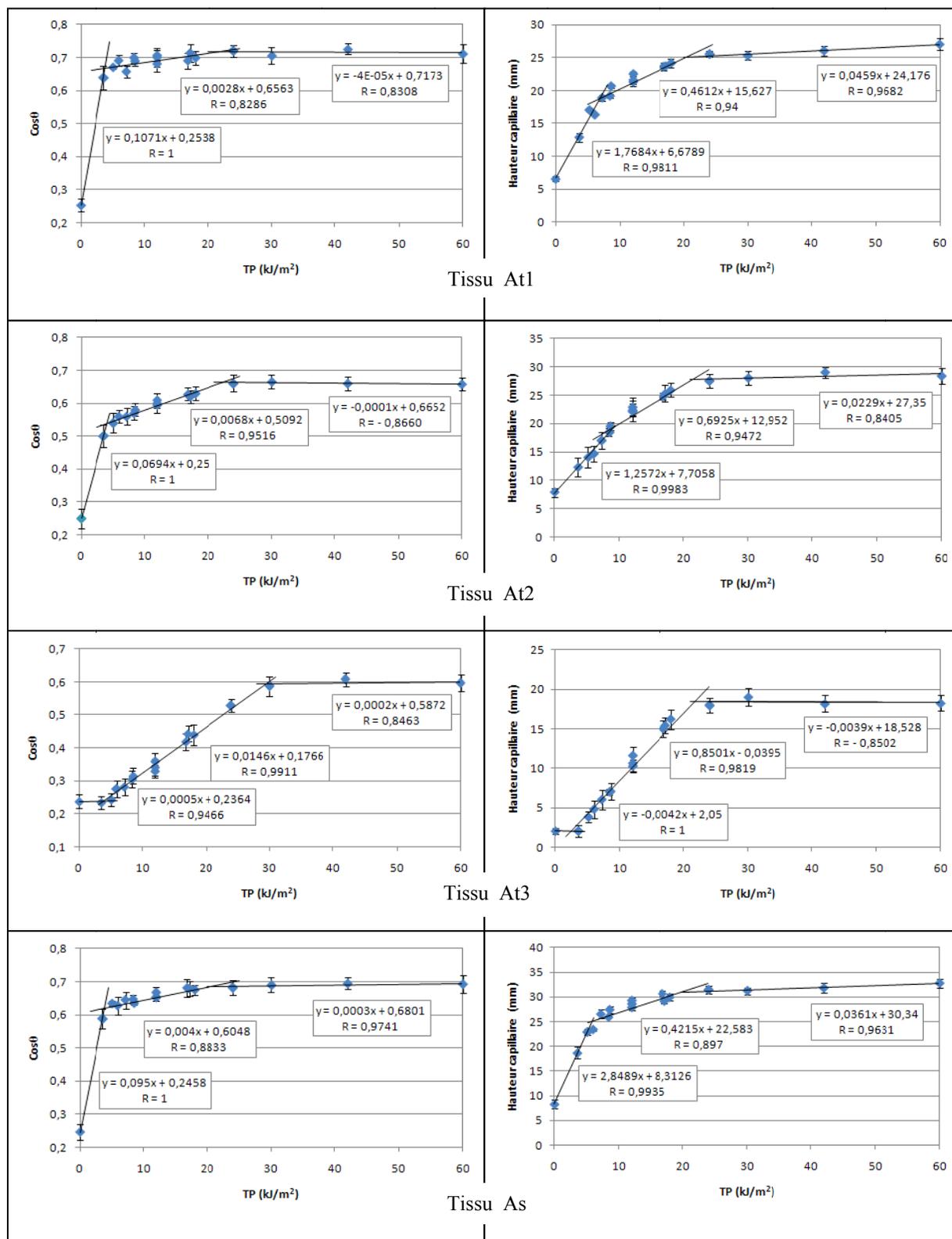


Figure 4- 7 : Mise en évidence de différentes zones des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire en fonction de TP, pour les tissus de PET

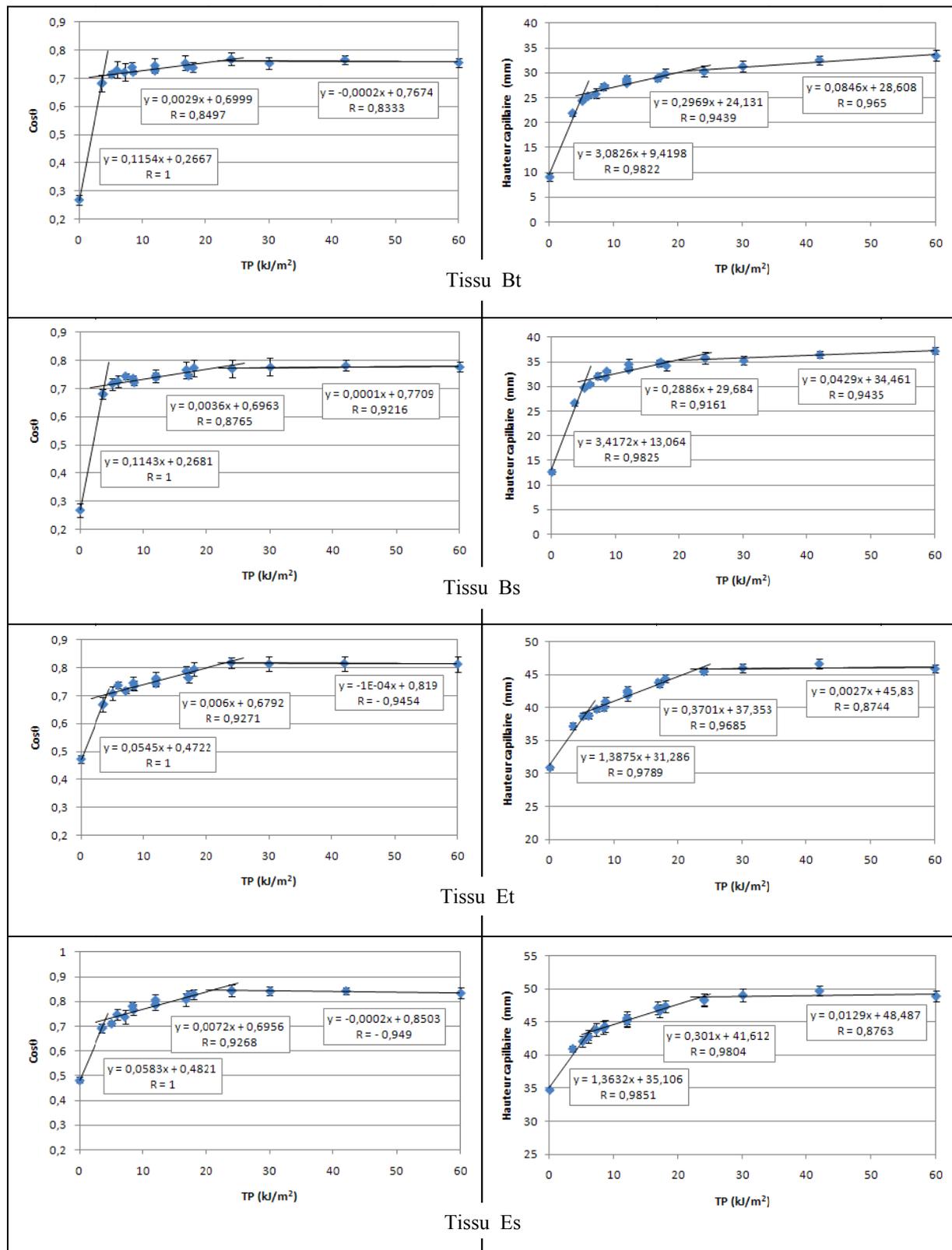


Figure 4- 8 : Mise en évidence de différentes zones des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire en fonction de TP, pour les tissus de micro-PET et de viscose

4.2.1 Etude « locale »

Le but de cette étude « locale » consiste à identifier séparément les paramètres pertinents relatifs à chaque zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire des différents tissus en fonction de TP. Elle comporte quatre phases:

- *Phase 1* : il s'agit de déterminer les paramètres les plus influents sur le cosinus de l'angle de contact (respectivement sur la hauteur capillaire) avant le traitement plasma. Sur les différentes courbes, ce cas correspond à l'ordonnée à l'origine (à puissance de traitement nulle).
- *Phase 2* : il s'agit de déterminer les paramètres les plus influents sur la pente de la droite de régression linéaire de la première zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact (respectivement de la hauteur capillaire) en fonction de TP.
- *Phase 3* : il s'agit de déterminer les paramètres pertinents relatifs à la pente de la droite de régression linéaire de la deuxième zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact (respectivement de la hauteur capillaire) en fonction de TP.
- *Phase 4* : il s'agit de déterminer les paramètres les plus influents sur la constante de la droite de régression linéaire de la troisième zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact (respectivement de la hauteur capillaire) en fonction de TP.

Pendant chaque phase, nous avons pris en compte uniquement les paramètres des tissus (la puissance électrique et la vitesse de traitement sont à chaque fois considérées constantes). En utilisant le critère de sensibilité flou, nous avons appliqué l'algorithme récurent proposé (*Chap2 - § 2.3.3*) afin de sélectionner les paramètres les plus pertinents et d'ordonner tous les paramètres d'entrée. Les résultats obtenus par cet algorithme sont présentés comme suit :

a) Phase 1 : Ordonnée à l'origine ($TP = 0 \text{ kJ/m}^2$)

Les étapes de sélection des paramètres les plus pertinents vis-à-vis du cosinus de l'angle de contact et la hauteur capillaire des tissus par l'algorithme proposé sont présentées respectivement dans le Tableau 4-9 et le Tableau 4-10. Lorsque nous identifions

les paramètres les plus pertinents dans une étape, les paramètres les moins pertinents ou corrélés sont éliminés en même temps.

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	x_1, \dots, x_{14}	$x_1, x_3, x_{10}, x_{12}, x_2, x_{11}, x_8, x_{13}, x_5, x_9, x_6, x_{14}, x_4, x_7$	x_1	x_7, x_{11}
Etape 2	$x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_3, x_{12}, x_{10}, x_2, x_8, x_{13}, x_5, x_6, x_4, x_9, x_{14}$	x_3	x_{14}
Etape 3	$x_2, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}$	$x_{12}, x_{10}, x_2, x_8, x_{13}, x_5, x_6, x_4, x_9$	x_{12}	x_9
Etape 4	$x_2, x_4, x_5, x_6, x_8, x_{10}, x_{13}$	$x_{10}, x_2, x_8, x_{13}, x_5, x_6, x_4$	x_{10}	x_4, x_{13}
Etape 5	x_2, x_5, x_6, x_8	x_2, x_8, x_5, x_6	x_2	x_6
Etape 6	x_5, x_8	x_8, x_5	x_8	x_5

Tableau 4- 9 : Sélection des paramètres pertinents relatifs au cosinus de l'angle de contact par l'algorithme proposé

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	x_1, \dots, x_{14}	$x_1, x_3, x_2, x_{10}, x_{14}, x_{11}, x_{12}, x_6, x_8, x_{13}, x_5, x_7, x_9, x_4$	x_1	x_4, x_{11}
Etape 2	$x_2, x_3, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_3, x_2, x_{10}, x_{14}, x_{13}, x_{12}, x_6, x_8, x_5, x_7, x_9$	x_3	x_9, x_7
Etape 3	$x_2, x_5, x_6, x_8, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_2, x_{10}, x_{14}, x_{13}, x_{12}, x_6, x_8, x_5$	x_2	x_5, x_6
Etape 4	$x_8, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_6, x_8$	x_{10}	x_8, x_{13}
Etape 5	x_{12}, x_{14}	x_{12}, x_{14}	x_{12}	x_{14}

Tableau 4- 10 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la hauteur capillaire des tissus par l'algorithme proposé

En comparant ces deux tableaux, nous pouvons remarquer que le cosinus de l'angle de contact et la hauteur capillaire présentent cinq paramètres pertinents communs. Ces paramètres sont la matière (x_1), la finesse des fibres (x_3), l'armure (x_2), la perméabilité à

l'air (x_{10}) et la densité des pics (x_{12}). Cependant, la finesse des fils de chaîne (x_8) a été identifiée comme un autre paramètre pertinent vis-à-vis du cosinus de l'angle de contact. Ces paramètres sélectionnés ont été classés par ordre de pertinence décroissante par l'algorithme proposé. Dans les deux cas, nous pouvons constater que la matière (x_1) occupe le premier rang parmi les paramètres les plus pertinents. Ceci suggère que la pertinence de ce paramètre est meilleure que celle des autres paramètres sélectionnés. De cette manière, plus un paramètre présente un rang élevé, plus il est considéré comme significatif.

b) Phase 2: Pente de régression linéaire de la première zone

Les Tableaux 4-11 et 4-12 présentent les étapes de sélection des paramètres pertinents relatifs à la pente de régression linéaire de la première zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire en fonction de TP, par l'algorithme proposé.

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	x_1, \dots, x_{14}	$x_1, x_3, x_{10}, x_{11}, x_{13}, x_2, x_{12}, x_6, x_{14}, x_8, x_9, x_5, x_4, x_7$	x_1	x_7, x_{11}
Etape 2	$x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_{10}, x_3, x_{13}, x_2, x_{12}, x_8, x_9, x_5, x_{14}, x_6, x_4$	x_{10}	x_4, x_{13}
Etape 3	$x_2, x_3, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{12}, x_{14}$	$x_3, x_{12}, x_2, x_8, x_9, x_5, x_{14}, x_6$	x_3	x_6
Etape 4	$x_2, x_5, x_8, x_9, x_{12}, x_{14}$	$x_{12}, x_2, x_8, x_9, x_5, x_{14}$	x_{12}	x_{14}
Etape 5	x_2, x_8, x_9, x_5	x_2, x_8, x_9, x_5	x_2	x_5
Etape 6	x_8, x_9	x_8, x_9	x_8	x_9

Tableau 4- 11 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la pente de régression linéaire de la première zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact en fonction de TP, par l'algorithme proposé

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	X_1, \dots, X_{14}	$X_1, X_3, X_{10}, X_2, X_{14}, X_{11}, X_6, X_{12}, X_{13}, X_7, X_8, X_5, X_9, X_4$	X_1	X_4, X_{11}
Etape 2	$X_2, X_3, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{12}, X_{13}, X_{14}$	$X_3, X_{10}, X_2, X_{13}, X_{14}, X_{12}, X_8, X_6, X_5, X_7, X_9$	X_3	X_9, X_7
Etape 3	$X_2, X_5, X_6, X_8, X_{10}, X_{12}, X_{13}, X_{14}$	$X_{10}, X_2, X_{13}, X_{14}, X_{12}, X_8, X_6, X_5$	X_{10}	X_5, X_{13}
Etape 4	$X_2, X_6, X_8, X_{12}, X_{14}$	$X_2, X_{12}, X_{14}, X_8, X_6$	X_2	X_8, X_6
Etape 5	X_{12}, X_{14}	X_{12}, X_{14}	X_{12}	X_{14}

Tableau 4- 12 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la pente régression linéaire de la première zone des courbes représentant l'évolution de la hauteur capillaire en fonction de TP, par l'algorithme proposé

En examinant ces tableaux, nous pouvons remarquer que les paramètres pertinents sélectionnés lors de cette phase sont identiques à ceux sélectionnés lors de la phase précédente en ce qui concerne le cosinus de l'angle de contact et la hauteur capillaire. La différence qui se présente cette fois-ci est que les rangs des paramètres les plus pertinents sont un peu différents. Par exemple, nous pouvons noter que la perméabilité à l'air (x_{10}) est passée du quatrième rang lors de la phase précédente au deuxième rang pour le cosinus de l'angle de contact et au troisième rang pour la hauteur capillaire. Ceci indique une augmentation de la pertinence de ce paramètre.

c) Phase 3: Pente de régression linéaire de la deuxième zone

Les Tableaux 4-13 et 4-14 illustrent les résultats obtenus par la méthode de sélection utilisée.

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	x_1, \dots, x_{14}	$x_{10}, x_3, x_1, x_{13}, x_{11}, x_2, x_8, x_9, x_{12}, x_{14}, x_5, x_6, x_4, x_7$	x_{10}	x_7, x_{13}
Etape 2	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{11}, x_{12}, x_{14}$	$x_3, x_1, x_{11}, x_2, x_{12}, x_8, x_9, x_{14}, x_5, x_6, x_4$	x_3	x_4
Etape 3	$x_1, x_2, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{11}, x_{12}, x_{14}$	$x_1, x_{11}, x_{12}, x_2, x_8, x_9, x_{14}, x_5, x_6$	x_1	x_6, x_{11}
Etape 4	$x_2, x_5, x_8, x_9, x_{12}, x_{14}$	$x_{12}, x_2, x_{14}, x_8, x_9, x_5$	x_{12}	x_5
Etape 5	x_2, x_8, x_9, x_{14}	x_2, x_{14}, x_8, x_9	x_2	x_9
Etape 6	x_8, x_{14}	x_{14}, x_8	x_{14}	x_8

Tableau 4- 13 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la pente de régression linéaire de la deuxième zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact en fonction de TP, par l'algorithme proposé

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	x_1, \dots, x_{14}	$x_1, x_{10}, x_3, x_2, x_{11}, x_{14}, x_8, x_{13}, x_{12}, x_5, x_6, x_9, x_4, x_7$	x_1	x_7, x_{11}
Etape 2	$x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_{10}, x_3, x_2, x_{13}, x_{14}, x_{12}, x_8, x_5, x_6, x_9, x_4$	x_{10}	x_4, x_{13}
Etape 3	$x_2, x_3, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{12}, x_{14}$	$x_2, x_3, x_{14}, x_{12}, x_8, x_5, x_6, x_9$	x_2	x_9, x_6
Etape 4	$x_3, x_5, x_8, x_{12}, x_{14}$	$x_3, x_{12}, x_8, x_{14}, x_5$	x_3	x_5
Etape 5	x_8, x_{12}, x_{14}	x_{12}, x_8, x_{14}	x_{12}	x_{14}, x_8

Tableau 4- 14 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la pente de régression linéaire de la deuxième zone des courbes représentant l'évolution de la hauteur capillaire en fonction de TP, par l'algorithme proposé

Comme dans les deux phases précédentes, nous pouvons remarquer que la matière (x_1), la finesse des fibres (x_3), l'armure (x_2), la perméabilité à l'air (x_{10}) et la densité des pics (x_{12}) ont été identifiées par l'algorithme proposé comme les paramètres les plus

influent sur la pente de régression linéaire de la deuxième zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire des différents tissus en fonction de TP. Par contre, nous pouvons noter que le cosinus de l'angle de contact présente un autre paramètre pertinent qui est la surface totale des fibres (x_{14}). En comparant les résultats obtenus lors de cette phase à ceux obtenus lors de la phase précédente, on peut remarquer que la perméabilité à l'air (x_{10}) est passée du deuxième rang au premier pour le cosinus de l'angle de contact et du troisième rang au deuxième pour la hauteur capillaire. Ceci souligne que ce paramètre possède une influence sur les résultats du traitement plasma. En outre, nous pouvons noter, pour le cosinus de l'angle de contact, que la finesse de fibre (x_3) est passée du troisième rang au deuxième et devient classée juste avant la matière (x_1). Ceci indique aussi que la pertinence de ce paramètre augmente.

d) Phase 4: Constante de régression linéaire de la troisième zone

Les résultats de sélection obtenus sont exposés dans les Tableaux 4-15 et 4-16 ci-dessous.

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	x_1, \dots, x_{14}	$x_1, x_{10}, x_3, x_{11}, x_{12}, x_2, x_8, x_6, x_{13}, x_{14}, x_4, x_9, x_5, x_7$	x_1	x_7, x_{11}
Etape 2	$x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_{10}, x_3, x_{12}, x_2, x_8, x_6, x_{13}, x_{14}, x_4, x_9, x_5$	x_{10}	x_5, x_{13}
Etape 3	$x_2, x_3, x_4, x_6, x_8, x_9, x_{12}, x_{14}$	$x_3, x_{12}, x_2, x_8, x_{14}, x_6, x_4, x_9$	x_3	x_9, x_4
Etape 4	$x_2, x_6, x_8, x_{12}, x_{14}$	$x_{12}, x_2, x_8, x_{14}, x_6$	x_{12}	x_6
Etape 5	x_2, x_8, x_{14}	x_2, x_{14}, x_8	x_2	x_8, x_{14}

Tableau 4- 15 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la constante de régression linéaire de la troisième zone des courbes représentant l'évolution de cosinus de l'angle de contact en fonction de TP, par l'algorithme proposé

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	x_1, \dots, x_{14}	$x_1, x_{10}, x_3, x_2, x_{14}, x_{11}, x_6, x_{12}, x_{13}, x_8, x_5, x_9, x_4, x_7$	x_1	x_7, x_{11}
Etape 2	$x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_3, x_{10}, x_2, x_{13}, x_{14}, x_{12}, x_8, x_6, x_5, x_9, x_4$	x_3	x_4
Etape 3	$x_2, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_{10}, x_2, x_{13}, x_{14}, x_{12}, x_8, x_6, x_9, x_5$	x_{10}	x_5, x_{13}
Etape 4	$x_2, x_6, x_8, x_9, x_{12}, x_{14}$	$x_2, x_{12}, x_{14}, x_8, x_6, x_9$	x_2	x_9, x_6
Etape 5	x_8, x_{12}, x_{14}	x_{12}, x_{14}, x_8	x_{12}	x_8, x_{14}

Tableau 4- 16 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la constante de régression linéaire de la troisième zone des courbes représentant l'évolution de la hauteur capillaire en fonction de TP, par l'algorithme proposé

D'après ces tableaux, nous pouvons remarquer que les paramètres pertinents sélectionnés par l'algorithme proposé sont identiques pour les deux sorties considérées. Par comparaison avec la phase précédente, nous pouvons constater, que la matière (x_1) est passée du troisième rang au premier juste avant la perméabilité à l'air (x_{10}) et la finesse des fibres (x_3), pour le cosinus de l'angle de contact. En ce qui concerne la hauteur capillaire, nous pouvons noter, que la finesse des fibres (x_3) est passée du quatrième rang au deuxième juste après la matière (x_1). Ceci indique que lorsque la puissance de traitement devient très élevée, le cosinus de l'angle de contact et la hauteur capillaire arrivent à des paliers dont les valeurs correspondantes dépendent essentiellement de la structure et de la finesse des fibres. En effet, la diminution du diamètre des fibres entraîne une augmentation de la surface offerte au traitement plasma ce qui est en faveur d'une meilleure oxydation.

En résumant ainsi, nous avons remarqué pendant les quatre phases étudiées que les paramètres des tissus les plus pertinents communs au cosinus de l'angle de contact et à la hauteur capillaire sont la matière (x_1), la finesse des fibres (x_3), l'armure (x_2), la perméabilité à l'air (x_{10}) et la densité des pics (x_{12}). Cependant, en ce qui concerne le cosinus de l'angle de contact, nous avons noté que la finesse des fils de chaîne (x_8) a été identifiée comme pertinente dans les phases 1 et 2 et que la surface totale des fibres (x_{14}) a été identifiée comme pertinente dans la phase 3. En comparant les quatre phases entre

elles, nous pouvons constater que les rangs des paramètres issus de la méthode de sélection sont un peu différents. Le même constat est observé en comparant les résultats relatifs aux deux sorties considérées, lors d'une même phase. Ainsi, afin d'affiner la procédure de sélection des paramètres les plus pertinents, nous allons entamer dans le paragraphe suivant une étude de sélection « globale ».

4.2.2 Etude « globale »

Le but de cette étude « globale » consiste à déterminer les paramètres pertinents relatifs au cosinus de l'angle de contact et à la capillarité des différents tissus, en utilisant la totalité des données mesurées. En effet, nous avons ajouté les paramètres du processus de traitement plasma (puissance de traitement (x_{15}) et vitesse de traitement (x_{16})) à l'ensemble des paramètres des tissus étudiés. Comme précédemment, nous avons appliqué l'algorithme proposé afin de sélectionner les paramètres d'entrée les plus pertinents et éliminer ceux qui sont les moins pertinents ou qui sont corrélés avec les paramètres les plus pertinents. Les Tableaux 4-17 et 4-18 montrent les étapes de cet algorithme pour sélectionner les paramètres pertinents relatifs au cosinus de l'angle de contact et à la hauteur capillaire des tissus.

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	x_1, \dots, x_{16}	$x_{15}, x_{16}, x_1, x_{12}, x_2, x_{11}, x_{10}, x_8, x_3, x_9, x_4, x_{13}, x_5, x_{14}, x_6, x_7$	x_{15}	x_7
Etape 2	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{16}$	$x_{16}, x_1, x_{10}, x_2, x_{12}, x_3, x_{11}, x_8, x_9, x_{13}, x_{14}, x_5, x_6, x_4$	x_{16}	x_4
Etape 3	$x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_1, x_{10}, x_3, x_2, x_{12}, x_{11}, x_8, x_9, x_6, x_{14}, x_5$	x_1	x_5, x_{11}
Etape 4	$x_2, x_3, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_{10}, x_3, x_2, x_{12}, x_{13}, x_8, x_9, x_{14}, x_6$	x_{10}	x_6, x_{13}
Etape 5	$x_2, x_3, x_8, x_9, x_{12}, x_{14}$	$x_3, x_2, x_{12}, x_{14}, x_8, x_9$	x_3	x_9
Etape 6	x_2, x_8, x_{12}, x_{14}	x_{12}, x_{14}, x_2, x_8	x_{12}	x_8
Etape 7	x_2, x_{14}	x_2, x_{14}	x_2	x_{14}

Tableau 4- 17 : Sélection des paramètres pertinents relatifs au cosinus de l'angle de contact par l'algorithme proposé

	Paramètres d'entrée restants	Paramètres rangés par ordre décroissant de critère de sensibilité flou ΔS	Paramètres plus pertinents	Paramètres éliminés
Etape 1	x_1, \dots, x_{16}	$x_{15}, x_1, x_{12}, x_{16}, x_3, x_{10}, x_8, x_{13}, x_6, x_2, x_{14}, x_{11}, x_4, x_9, x_5, x_7$	x_{15}	x_7
Etape 2	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{16}$	$x_1, x_{16}, x_3, x_{12}, x_{10}, x_8, x_{13}, x_6, x_2, x_{11}, x_{14}, x_9, x_5, x_4$	x_1	x_4, x_{11}
Etape 3	$x_2, x_3, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{16}$	$x_{16}, x_{10}, x_3, x_{12}, x_8, x_{13}, x_2, x_6, x_{14}, x_9, x_5$	x_{16}	x_5
Etape 4	$x_2, x_3, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$	$x_{10}, x_3, x_{12}, x_6, x_2, x_8, x_{14}, x_{13}, x_9$	x_{10}	x_9, x_{13}
Etape 5	$x_2, x_3, x_6, x_8, x_{12}, x_{14}$	$x_3, x_{12}, x_{14}, x_8, x_2, x_6$	x_3	x_6
Etape 6	x_2, x_8, x_{12}, x_{14}	x_2, x_{12}, x_{14}, x_8	x_2	x_8
Etape 7	x_{12}, x_{14}	x_{12}, x_{14}	x_{12}	x_{14}

Tableau 4- 18 : Sélection des paramètres pertinents relatifs à la hauteur capillaire des tissus par l'algorithme proposé

En comparant ces deux tableaux, nous pouvons remarquer que la puissance électrique (x_{15}), la vitesse de traitement (x_{16}), la matière (x_1), la finesse des fibres (x_3), la perméabilité à l'air (x_{10}), l'armure (x_2) et la densité des pics (x_{12}) ont été identifiées comme les paramètres les plus pertinents vis-à-vis du cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire. Pour ces deux sorties, nous pouvons noter que la puissance électrique (x_{15}) a été identifiée comme un paramètre pertinent pendant la première étape de la procédure de sélection. Ceci suggère que la pertinence de ce paramètre est plus significative que les autres paramètres sélectionnés. De la même manière, plus le rang d'un paramètre pertinent est élevé, plus il est considéré comme important vis-à-vis de la sortie correspondante.

En comparant les résultats issus de deux études « locale » et « globale », nous pouvons constater que les paramètres les plus pertinents des tissus sont presque identiques dans les deux cas. La combinaison de ces résultats montre que la matière (x_1), la finesse des fibres (x_3), la perméabilité à l'air (x_{10}), l'armure (x_2) et la densité des pics (x_{12}) sont les paramètres les plus pertinents des tissus. De ce fait, nous pouvons déduire que l'ensemble de ces paramètres ainsi que les paramètres du plasma (puissance électrique (x_{15}) et vitesse de traitement (x_{16})) constituent les variables les plus discriminantes vis-à-vis de cosinus de

l'angle de contact et de la hauteur capillaire des tissus. Ces derniers vont servir de paramètres d'entrée pour les modèles des réseaux de neurones [JELIL, 2009b].

Dans cette partie, l'utilisation du critère de sensibilité flou a permis de réduire le nombre des paramètres du procédé plasma de plus de 50 %. Les résultats obtenus montrent que l'effet du traitement plasma dépend non seulement des paramètres du plasma (puissance électrique et vitesse de traitement) mais aussi des paramètres des tissus. Ainsi, les paramètres sélectionnés des tissus vont permettre de mieux comprendre l'impact de la structure textile sur les modifications de surface apportées par plasma, en vue d'une optimisation de traitement.

Dans ce qui suit, nous allons proposer une analyse et discussion des résultats obtenus.

4.3 Discussion

En reprenant les paramètres pertinents sélectionnés dans la partie précédente, nous proposons d'analyser leur influence sur les modifications de surface apportées par plasma.

4.3.1 Effet de la puissance électrique et de la vitesse de traitement

Pour étudier l'effet de la puissance électrique (x_{15}) et de la vitesse de traitement (x_{16}) sur la modification de surface des tissus par plasma, nous avons pris en compte la puissance de traitement (TP) qui a été calculée en fonction de ces deux paramètres (*Chap 3 - § 3.2*). L'utilisation de ce paramètre va nous permettre d'évaluer les variations du cosinus de l'angle de contact (respectivement de la hauteur capillaire des tissus) en fonction de la puissance électrique et de la vitesse de traitement en même temps. Ainsi, lorsque la puissance électrique augmente et/ou la vitesse de traitement diminue ceci va se traduire par une augmentation de la valeur de TP. En toute logique, plus la puissance électrique est élevée, plus la densité des espèces réactives présentes dans le plasma sera forte et donc plus le taux d'oxygène présent en surface de tissu sera important. De même, plus la vitesse de traitement est faible, plus le textile restera de temps en contact avec le plasma et donc plus la puissance reçue par sa surface sera grande. Les Figures 4-9 et 4-10 montrent les variations du cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire des tissus de PET, micro-PET et viscose en fonction de la puissance de traitement.

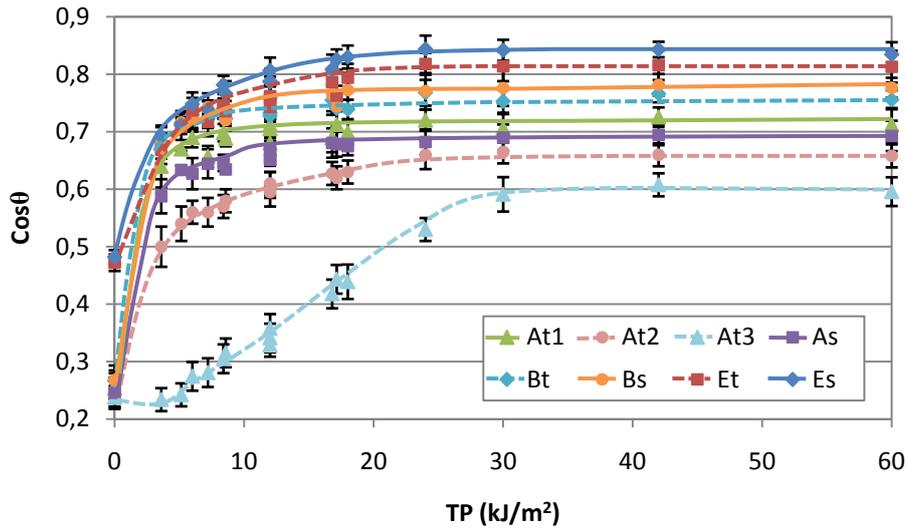


Figure 4- 9 : Variations du cosinus de l'angle de contact en fonction de la puissance de traitement plasma

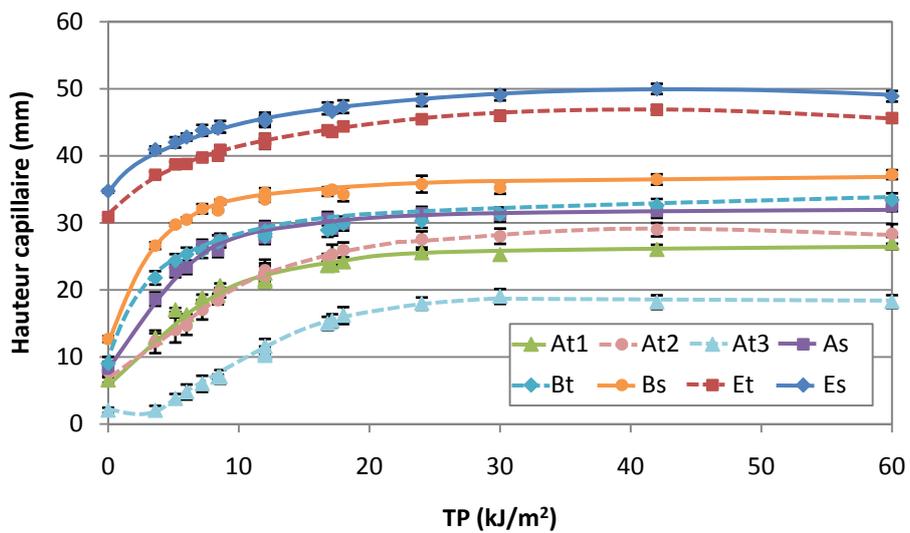


Figure 4- 10 : Variations de la hauteur capillaire en fonction de la puissance de traitement plasma

D'après ces figures, nous remarquons que la mouillabilité et la capillarité de différents tissus augmentent d'une manière plus ou moins importante avec la puissance de traitement, avant d'arriver à un palier. Il est donc clair que plus la puissance de traitement est forte, plus l'oxydation des fibres présentes en surface et à l'intérieur de textile sera importante. Par conséquent, la puissance de traitement semble être un paramètre important pour contrôler le procédé plasma. En utilisant ce paramètre, on pourra varier en même

temps la puissance électrique et la vitesse de traitement et suivre les modifications des propriétés de mouillage des tissus en fonction de ces deux paramètres.

En outre, en examinant les résultats de sélection des paramètres issus de l'étude « globale », nous avons remarqué que la puissance électrique (x_{15}) a été identifiée comme un paramètre pertinent dès la première étape de la procédure de sélection. Ceci suggère que la pertinence de ce paramètre est plus significative que celle de la vitesse de traitement (x_{16}). Mais, en réalité, il est difficile de déterminer quel est, parmi ces deux paramètres, celui qui apporte le plus de modifications puisque leurs effets semblent être complémentaires. En fait, pour des traitements à puissance électrique constante, plus la vitesse de traitement est faible, plus l'oxydation est importante. De même, si on considère une vitesse constante, plus la puissance électrique est forte, plus l'oxydation est importante. Nous pouvons donc conclure que la puissance électrique et la vitesse de traitement sont des paramètres importants qui doivent être pris en considération lors du traitement plasma. Ces résultats sont en concordance avec des autres études [KABAJEV, 2004], [VATUNA, 2004], [HWANG, 2005], [WEI, 2006], [GEYTER, 2006], [VRABIC, 2007], [LEROUX, 2007], [YAMAN, 2009] qui ont montré que l'augmentation de la puissance et/ou du temps de traitement résulte en une amélioration de l'hydrophilie et de la capillarité des matériaux textiles.

4.3.2 Effet de la matière

Concernant la matière (x_1), nous pouvons constater d'après les Figures 4-9 et 4-10 (§ 4.3.1) que la mouillabilité et la capillarité des tissus de viscose non traités sont meilleures que celles des tissus de PET et micro-PET non traités. Ceci peut être attribué au fait que les fibres de viscose ont une énergie de surface plus importante en comparaison avec les fibres de polyester qui sont hydrophobes par nature. Après traitement par plasma, la mouillabilité maximale semble dépendre principalement de la structure des fibres. En fait, pour les tissus en viscose, les paliers sont atteints à des valeurs de cosinus de l'angle de contact plus importantes que celles pour les tissus de PET et micro-PET (Figure 4-9). Le même type d'effet a été observé pour la capillarité. Ceci indique que la capillarité maximale dépend aussi de la nature des fibres. Ainsi, nous pouvons conclure que la nature chimique du substrat a un impact sur les modifications apportées par les traitements plasma. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Morent et al. [MORENT, 2007] et McCord et

al. [MCCORD, 2002] qui ont observé que le taux d'oxydation maximum pouvant être atteint après le traitement par plasma dépend de la nature du polymère traité.

4.3.3 Effet de la finesse des fibres

L'effet de la finesse des fibres (x_3) peut être observé en comparant les tissus de PET et de micro-PET. La Figure 4-11 montre l'évolution du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface de ces tissus en fonction de la finesse des fibres.

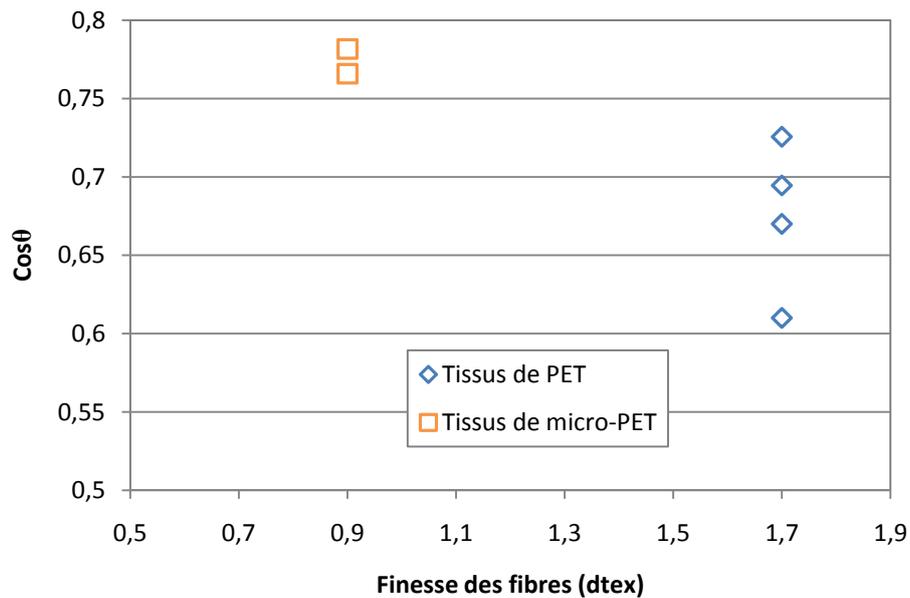


Figure 4- 11 : Cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus de PET et micro-PET en fonction de la finesse des fibres ($TP = 60 \text{ kJ/m}^2$)

Nous pouvons remarquer après traitement plasma que l'augmentation de la mouillabilité des tissus en micro-PET est plus importante que celle des tissus en PET. Ceci peut s'expliquer par le fait que la diminution du diamètre des fibres entraîne une augmentation de la surface offerte au traitement plasma et par la suite, le nombre des sites polaires introduites à la surface des tissus en microfibrilles de polyester va être plus important que celui des tissus en fibres ordinaires de PET ce qui leur confère une meilleure énergie de surface. Ainsi, en considérant le même type de polymère, nous pouvons déduire que le traitement plasma des fibres plus fines permet d'obtenir des propriétés de mouillage plus importantes.

En outre, nous pouvons remarquer après traitement que les tissus micro-polyesters ont atteint une hauteur capillaire plus importante que celle des tissus en PET (Figure 4-12). Cet effet est plus prononcé en considérant le même type d'armure. Ceci peut être attribué aussi

à la surface totale des fibres. En fait, vu que les tissus en micro-PET ont une surface totale plus importante que celle des tissus en PET, l'oxydation des fibres présentes à l'intérieur de ces tissus va être plus importante le fait qui permet d'améliorer leur affinité aux liquides. Ainsi, nous pouvons conclure que le traitement des fibres plus fines est plus efficace. Ce résultat semble être en accord avec le travail de Wei et al. [WEI, 2006] qui, en traitant des non-tissés de polypropylène par un plasma à pression réduite sous dioxygène, ont observé que l'augmentation du pouvoir capillaire est plus importante dans le cas du non-tissé constitué de microfibrilles.

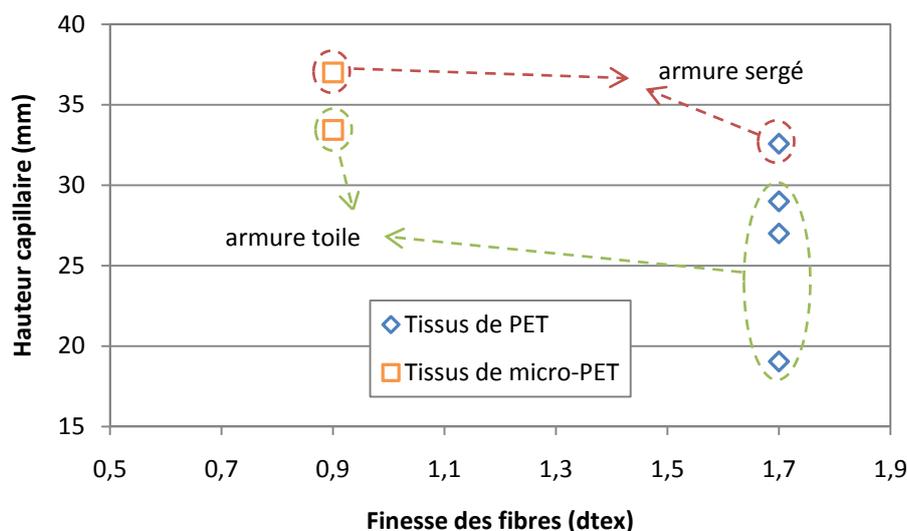


Figure 4- 12 : Hauteur capillaire des tissus de PET et micro-PET en fonction de la finesse des fibres (TP = 60 kJ/m²)

4.3.4 Effet de la perméabilité à l'air

Pour déterminer l'influence de la perméabilité à l'air (x_{10}) sur les résultats du traitement plasma, nous avons étudié l'évolution du cosinus de l'angle de contact en fonction de ce paramètre à trois différentes puissances de traitement (TP) (0 ; 3,6 et 12 kJ/m²) (Figure 4-13). Nous pouvons remarquer que les tissus At1, At2, As, Bt, Bs, Et et Es montrent une amélioration considérable de la mouillabilité même pour de faibles valeurs de TP. Cependant, le tissu At3 montre un comportement différent et présente une perméabilité à l'air plus élevée comparée aux autres tissus (Chap 3 - Tableau 3-2). En outre, nous pouvons constater après traitement que plus la perméabilité à l'air des tissus de PET et micro-PET (respectivement de viscose) est moins élevée, plus la valeur du cosinus de l'angle de contact correspondant est importante.

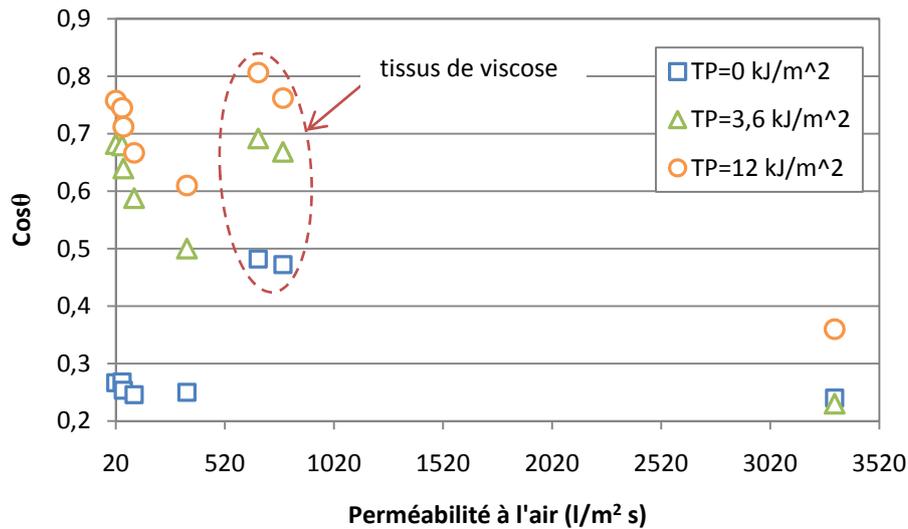


Figure 4- 13 : Variations du cosinus de l'angle de contact en fonction de la perméabilité à l'air et de la puissance de traitement (TP) (0 ; 3,6 and 12 kJ/m²)

Afin de mieux apercevoir l'influence de la perméabilité à l'air, nous avons suivi l'évolution de la pente du cosinus de l'angle de contact en fonction de ce paramètre pour une puissance de traitement de 3,6 kJ/m² (Figure 4-14). Nous pouvons remarquer que l'amélioration de la mouillabilité semble être plus sensible à la puissance de traitement pour les tissus Bt, Bs, At1 et As comparés aux tissus At2, Es et Et. Au contraire, la mouillabilité de tissu At3 n'est pas améliorée pour des faibles valeurs de TP. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que, pour une même TP, les espèces réactives du plasma ont une difficulté plus importante pour pénétrer dans les tissus moins perméables à l'air par comparaison aux tissus dont la perméabilité à l'air est plus élevée. En fait, lorsque les tissus sont moins perméables à l'air, il aura moins des pores permettant le passage de plasma à travers ces tissus et par la suite, les fibres présentes à leurs surfaces seront traitées en premier lieu et le traitement sera plus efficace que celui des tissus dont la perméabilité à l'air est plus grande. Par contre, lorsque la structure tissée est très perméable au gaz, le plasma aura plus de chance de passer dans les pores ouverts de l'échantillon que d'être en contact avec la matière. Il faut donc une puissance de traitement plus importante pour que le traitement soit optimal. Ainsi, nous pouvons déduire que les espèces réactives du plasma ont une énergie suffisante pour modifier et activer la surface des tissus moins perméable à l'air même à des faibles TP, cependant, une TP plus importante est nécessaire pour oxyder la surface des structures textiles dont la perméabilité à l'air est plus importante.

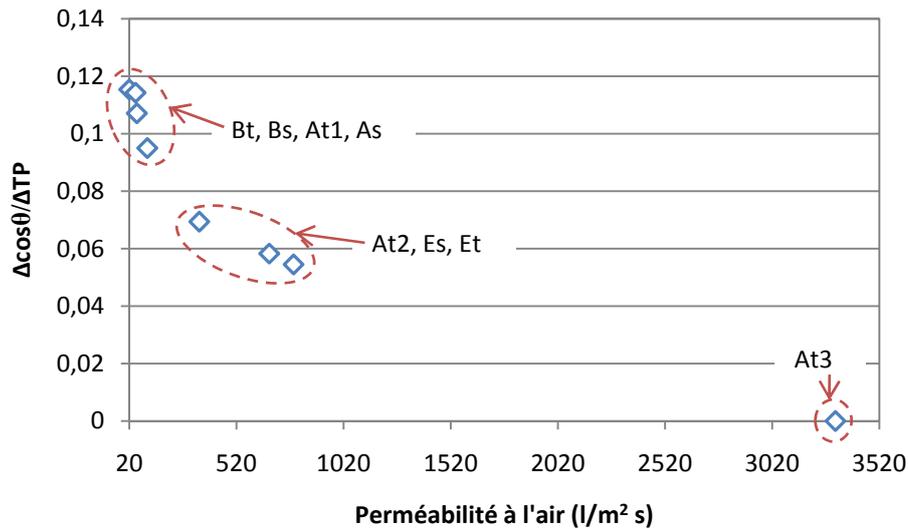


Figure 4- 14 : Evolution de la pente du cosinus de l'angle de contact en fonction de la perméabilité à l'air des différents tissus (TP = 3,6 kJ /m²)

Le Tableau 4-19 regroupe les valeurs des TP correspondant à 95 % de la valeur maximale du cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire pour les différents tissus. Ces puissances de traitement semblent être satisfaisantes pour obtenir une bonne oxydation en surface et une bonne activation des fibres présentes à l'intérieur de la structure textile. Cependant, elles ne sont pas nécessairement optimales.

Tissu	Perméabilité à l'air (l/m ² s)	TP correspondant à 95% de la valeur maximale du cosinus de l'angle de contact (kJ/m ²)	TP correspondant à 95% de la valeur maximale de la hauteur capillaire (kJ/m ²)
At1	55	≈ 12	≈ 30
At2	346	≈ 18	≈ 24
At3	3315	≈ 24	≈ 24
As	104	≈ 12	≈ 30
Bt	20	≈ 12	≈ 30
Bs	49	≈ 12	≈ 30
Et	786	≈ 18	≈ 24
Es	673	≈ 18	≈ 24

Tableau 4- 19 : Valeurs des TP correspondants à 95 % de la valeur maximale du cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire des différents tissus

D'après ce tableau, nous pouvons remarquer que l'oxydation des fibres à l'intérieur des tissus At1, At2, As, Bt, Bs, Et et Es a nécessité une puissance de traitement plus importante

que celle des fibres présentes en surface. De même, nous pouvons constater que plus la perméabilité à l'air est moins importante, plus la TP relatif au cosinus de l'angle de contact est faible et celle relative à la hauteur capillaire est importante. Par contre, pour le tissu At3, la mouillabilité et la capillarité ont atteint 95% de leurs valeurs maximales à une même TP d'environ 24 kJ/m². Il semble donc que la structure ouverte de ce tissu a permis de traiter d'une manière homogène l'ensemble des fibres présentes en surface et plus en profondeur. Ce résultat indique que plus la perméabilité à l'air est importante, plus il est aisé pour le plasma de traiter à cœur les matériaux. De ce fait, il est important d'adapter la puissance de traitement à la structure textile. Ainsi, nous pouvons conclure que la perméabilité à l'air a un impact sur la puissance de traitement pour obtenir une bonne oxydation en surface et sur la possibilité offerte au plasma de traiter les fibres présentes à l'intérieur du textile. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Leroux et al. [LEROUX, 200], [LEROUX, 2007] qui en traitant différents matériaux de poly(éthylène téréphtalate) par un plasma comme le notre, ont montré que chaque type de structure requiert une puissance de traitement adéquate pour une oxydation optimale. Ces auteurs ont émis l'hypothèse que la densité de matière du matériau a un impact sur le traitement plasma (*Chap 1 - Figure 1-22*).

4.3.5 Effet de l'armure

L'effet de l'armure (x_2) peut être observé en comparant les tissus constitués de fibres de même type entre eux. D'après la Figure 4-15, nous pouvons remarquer après traitement plasma que l'amélioration de la hauteur capillaire des tissus à armure sergé est légèrement plus importante que celle des tissus à armure toile. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que dans un tissu à l'armure de sergé, le nombre de points de liage entre les fils de chaîne et les duites est moins important que celui dans un tissu en armure toile. Ceci va permettre lors du traitement de faciliter le passage des espèces réactives du plasma à travers les interstices inter-fils et inter-fibres ce qui va entraîner ainsi une oxydation plus importante de la surface des fibres présentes à l'intérieur de ce tissu. Il en résulte une amélioration de l'affinité des fibres aux liquides qui se traduit par une augmentation du pouvoir capillaire.

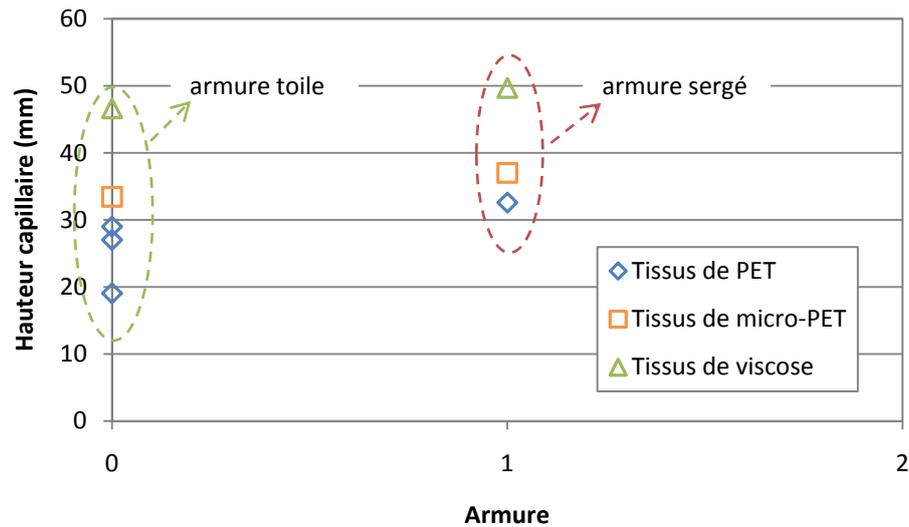


Figure 4- 15 : Hauteur capillaire en fonction de l'armure des différents tissus (TP = 60 kJ/m²)

4.3.6 Effet de la densité des pics

En ce qui concerne la densité des pics (x_{12}), ce paramètre correspond au nombre de pics par unité de surface. Physiquement, il permet d'obtenir une estimation de nombre moyen d'aspérités par unité de surface. La Figure 4-16 montre les variations du cosinus de l'angle de contact en fonction de la densité des pics pour une TP de 60 kJ/m². Pour chaque type de tissu, nous pouvons remarquer après traitement que plus la densité des pics est grande, plus la valeur du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface de tissu est importante. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que lorsque le nombre d'aspérités superficielles est élevé, la réaction des espèces réactives du plasma serait plus importante au niveau de ces points et par la suite les sites polaires introduits à la surface par le traitement vont s'accrocher sur ces derniers. Il en résulte donc une amélioration de la mouillabilité.

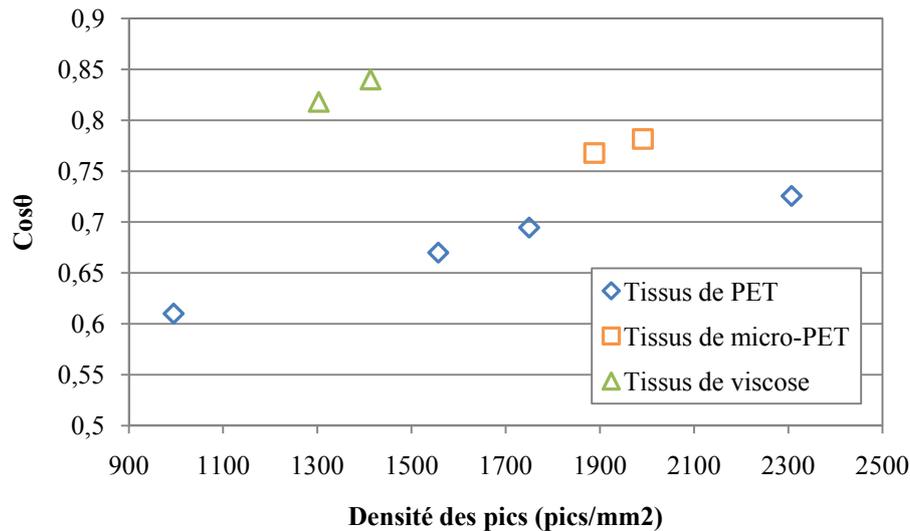


Figure 4- 16 : Variations du cosinus de l'angle de contact en fonction de la densité des pics des différents tissus (TP = 60 kJ/m²)

Par ailleurs, en utilisant le critère de sensibilité flou (§ 4.2), la rugosité de surface a été identifiée comme moins pertinente. Pour expliquer ce résultat, nous avons suivi l'évolution du cosinus de l'angle de contact de l'eau à la surface des tissus non traités en fonction de la rugosité. D'après la Figure 4-17, nous pouvons remarquer que les tissus de même nature ont presque le même cosinus de l'angle de contact, malgré qu'ils présentent de rugosités de surface différentes. Ceci indique que la rugosité n'a pas d'influence significative sur l'angle de contact de l'eau à la surface de ces tissus. Ce résultat semble être en accord avec les travaux de Perwuelz et al. [PERWUELZ, 2007] et Campagne [CAMPAGNE, 2009] qui ont observé que l'angle de contact pour un même polymère ne dépend pas de la rugosité de surface.

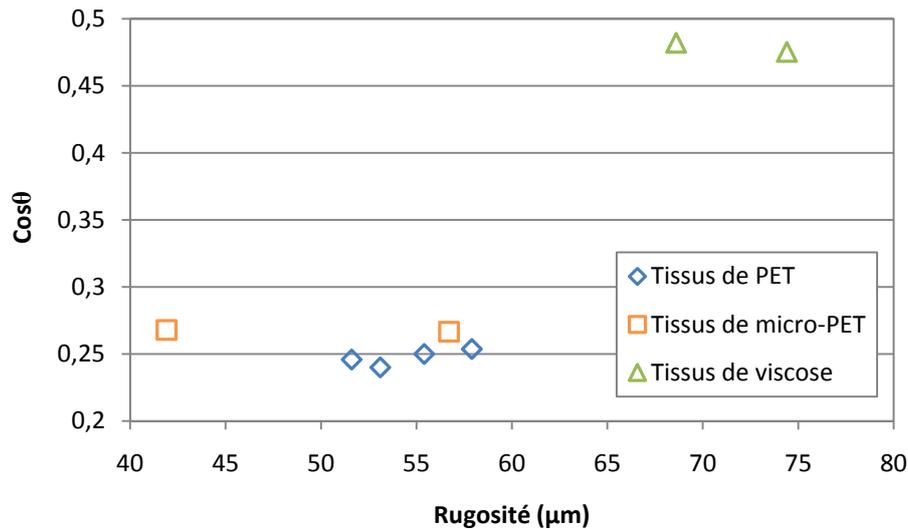


Figure 4- 17 : Variations du cosinus de l'angle de contact en fonction de la rugosité des différents tissus (TP = 0 kJ/m²)

N.B : les mesures de mouillabilité et de capillarité sont très sensibles à la présence des impuretés dans la structure textile. En effet, le traitement des matériaux textiles non propres peut conduire à des résultats erronés et non reproductibles. Ainsi, il est indispensable de nettoyer les échantillons avant le traitement par plasma afin de favoriser l'atteinte des résultats.

4.4 Conclusion

Cette étude a montré que les traitements par plasma atmosphérique de type décharges à barrière diélectrique utilisant l'air ambiant comme gaz plasmagène ont permis d'augmenter la mouillabilité et la capillarité des différents tissus vis-à-vis de l'eau distillée. L'amélioration de la mouillabilité est la résultante de l'oxydation des fibres présentes en surface, cependant, l'augmentation de la capillarité est la résultante d'une meilleure mouillabilité des fibres à l'intérieur des tissus. Ainsi, l'étude de ces deux propriétés de surface va permettre de caractériser la qualité de traitement en terme de répartition entre la surface textile et le cœur du matériau. Les résultats obtenus ont montré que l'oxydation des fibres présentes à l'intérieur des tissus At1, At2, As, Bt, Bs, Et et Es a nécessité une puissance de traitement plus importante que celle des fibres présentes en surface. Par contre, pour le tissu At3, le traitement d'oxydation semble être homogène sur l'ensemble des fibres du matériau.

Deux études « locale » et « globale » ont été menées afin de déterminer les paramètres les plus influents des tissus traités et du processus de traitement plasma, en utilisant le critère de sensibilité flou. La combinaison des résultats issus de ces deux études a mis en évidence que la puissance électrique, la vitesse de traitement, la matière, la finesse des fibres, l'armure, la perméabilité à l'air et la densité des pics sont les paramètres les plus pertinents. Ceci démontre bien que les modifications de surface apportées par plasma dépendent non seulement de la puissance du traitement, mais aussi des paramètres des tissus. En fait, la nature chimique du substrat traité a un impact sur la mouillabilité et la capillarité maximales pouvant être atteintes après traitement plasma. De même, la structure textile a un impact sur la puissance de traitement nécessaire pour obtenir une meilleure oxydation des fibres présentes en surface et à l'intérieur du matériau. Il est donc important d'adapter la puissance de traitement à la structure textile pour que le traitement soit optimal. Par conséquent, la sélection des paramètres pertinents va permettre d'une part de mieux contrôler et optimiser le procédé plasma, et d'autre part de réduire la complexité de la modélisation de ce procédé.

Chapitre 5 : Modélisation de la relation par réseaux de neurones

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les étapes de la mise en œuvre des réseaux de neurones, à savoir le choix des variables d'entrée, le prétraitement et le découpage de la base de données, la réalisation de l'apprentissage et l'optimisation de la structure neuronale. Pour éviter les phénomènes de sur-ajustement des réseaux de neurones, nous utiliserons deux techniques de régularisation : l'arrêt prématuré et la régularisation Bayésienne. Nous proposerons également deux algorithmes pour déterminer automatiquement le nombre de neurones cachés ainsi que le nombre d'itérations. De même, nous présenterons un certain nombre d'indicateurs statistiques pour évaluer les performances des modèles obtenus. Ensuite, nous exposerons les résultats de l'application de ces modèles au procédé plasma. Enfin, nous analyserons l'importance relative des paramètres d'entrée de ce procédé afin de mettre en évidence la contribution de chaque paramètre sur chacune des sorties.

5.1 Introduction

L'objectif de notre travail consiste à la conception d'un modèle qui permet de décrire la relation entre les paramètres pertinents sélectionnés des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma (paramètres d'entrée) et les propriétés spécifiques recherchées (paramètres de sortie). Pour élaborer un tel modèle, nous avons choisi d'utiliser une approche statistique basée sur les réseaux de neurones artificiels qui se positionnent comme une technique prometteuse du fait de leur parcimonie et de leur simplicité. En fait, les réseaux de neurones artificiels sont devenus en quelques années des outils précieux dans des domaines très divers de l'industrie et des services [MEIRELES, 2003]. Ils offrent une alternative pour la modélisation mathématique et font partie des modèles statistiques non linéaires aptes à modéliser des processus non linéaires et multi-variables, en raison de leur forte non linéarité et l'aspect de généralisation qu'ils présentent [CHEN, 1990], [KRASNOPOLSKY, 2002]. Il s'agit donc d'une puissante méthode de régression non linéaire qui permet une utilisation optimale des données disponibles, sans nécessiter des connaissances préalables sur la forme de la relation entre les variables. De ce fait, les réseaux de neurones se révèlent efficaces pour résoudre les problèmes complexes. De plus, ces outils offrent une grande capacité de calcul à un coût relativement faible.

5.2 Mise en œuvre des réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones réalisent des fonctions non linéaires paramétrées. Leur mise en œuvre nécessite :

- ✓ Le choix et la préparation de la base des données,
- ✓ La détermination de l'architecture de réseau,
- ✓ La réalisation de l'apprentissage,
- ✓ L'optimisation de l'architecture,
- ✓ L'évaluation des performances du modèle.

5.2.1 Choix et préparation de la base de données

Le processus d'élaboration d'un réseau de neurones commence toujours par le choix et la préparation des échantillons de données. Cette étape est cruciale pour favoriser le bon déroulement de l'apprentissage.

5.2.1.1 Détermination des entrées du réseau de neurones

Il est souvent préférable d'effectuer une analyse de données de manière à déterminer les caractéristiques discriminantes pour détecter ou différencier ces données. Ces caractéristiques constituent l'entrée du réseau de neurones. La sélection des entrées doit prendre en compte deux points essentiels :

- Premièrement, la dimension intrinsèque du vecteur des entrées doit être le plus petit possible afin d'atténuer la complexité du réseau de neurones et limiter le nombre de paramètres à optimiser pendant l'apprentissage.
- En second lieu, les entrées doivent être pertinentes pour la grandeur que l'on cherche à modéliser : elles doivent avoir une influence significative sur la valeur de la sortie.

Les variables sélectionnées vont servir d'entrées aux réseaux des neurones.

5.2.1.2 Prétraitement des données

D'une manière générale, les bases de données doivent subir un prétraitement afin d'être adaptées aux entrées et sorties du réseau de neurones. Un prétraitement courant consiste à effectuer une normalisation appropriée afin d'éviter le problème de saturation au niveau du mécanisme d'apprentissage. En effet, lorsque le vecteur d'entrée présente des éléments d'ordre de grandeurs et de nature différente, le réseau ne serait pas capable d'apprendre dans de bonnes conditions. Ainsi, il est préférable dans ce cas d'effectuer une normalisation des données afin qu'elles aient toutes la même influence statistique sur la conception du modèle.

Dans notre cas, les données sont normalisées de telle sorte que chaque variable aura une moyenne nulle et un écart type égal à l'unité. Les données normalisées s'écrivent (Equation 5-1):

$$x'_i = \frac{(x_i - \mu_i)}{\sigma_i} \quad (5-1)$$

où μ_i et σ_i sont la moyenne et l'écart type calculés sur l'ensemble des données correspondant à l'entrée i .

5.2.1.3 Découpage de la base de données

Afin de développer une application à base de réseau de neurones, il est nécessaire de disposer de deux bases de données: une base pour effectuer l'apprentissage de réseau et une autre pour tester le réseau obtenu afin de déterminer ses performances. On doit noter ici qu'il n'y a pas une règle précise pour la détermination de cette séparation de manière quantitative, néanmoins, on peut aller jusqu'à la division de type 2/3 et 1/3 ou 3/4 et 1/4 suivant le problème étudié et le nombre de données dont on dispose. Les deux bases de données ainsi obtenues doivent être suffisamment représentatives, autrement dit, il faudra qu'elles couvrent aussi complètement que possible le domaine de fonctionnement désiré pour le réseau. Notons bien qu'on peut réserver un troisième ensemble de données, appelé base de validation, pour contrôler la phase d'apprentissage du réseau.

5.2.2 Détermination de l'architecture de réseau

Le choix de l'architecture de réseau englobe le type de réseau, les entrées externes, le nombre de couches cachées, le nombre de neurones cachés, la ou les sorties, la nature des différentes connexions entre les neurones et la fonction d'activation des neurones dans chaque couche. Cette étape influence considérablement la qualité du résultat. En effet, l'introduction dans le modèle d'un trop grand nombre de paramètres risque de conduire à un sur-apprentissage, et donc, de détruire les capacités de généralisation de réseau. De ce fait, pour ne pas augmenter de façon inutile la complexité du réseau, l'architecture que nous avons choisie inclut une seule couche cachée. Ce choix découle de la propriété d'approximation universelle des réseaux de neurones. Dans ce cadre, Cybenko [CYBENKO, 1989] et Funahashi [FUNAHASHI, 1989] ont montré qu'une seule couche

cachée utilisant des fonctions de transfert sigmoïdes était suffisante pour pouvoir approximer toute fonction non linéaire avec la précision voulue. Par conséquent, les réseaux utilisés dans cette étude sont constitués de trois couches. La couche d'entrée reçoit les données du problème à traiter et elle transmet ses résultats à la couche cachée qui, ayant de nouvelles données et de nouveaux poids retransmet ses données résultantes à la couche de sortie qui fournit les neurones de sortie. De cette manière, l'information provenant des entrées, circulent vers les sorties sans retour en arrière et, il n'y a aucune connexion entre neurones d'une même couche. Les deux fonctions d'activation utilisées sont les suivantes : une fonction d'activation sigmoïde en tangente hyperbolique (Equation 5-2) dans la couche cachée et une fonction linéaire dans la couche de sortie. En ce qui concerne le nombre de neurones cachés, ce nombre n'est pas fixé a priori. Il sera déterminé pendant la phase d'apprentissage [JELIL, 2008], [JELIL, 2009b].

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-x}} - 1 \quad (5-2)$$

La Figure 5-1 représente l'architecture du réseau de neurones adopté.

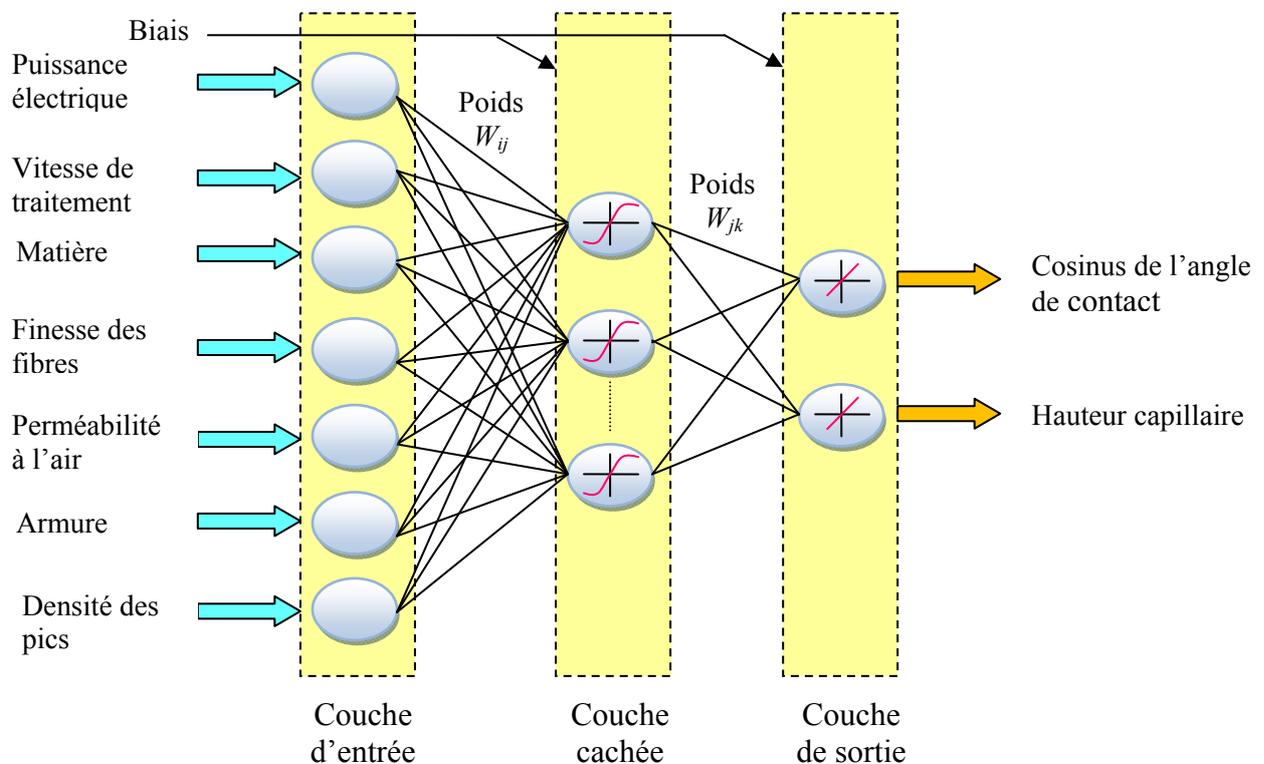


Figure 5-1 : Structure d'un réseau de neurone à trois couches (W_{ij} étant le poids des connexions entre les neurones d'entrée et cachés, W_{jk} le poids des connexions entre les neurones cachés et de sortie)

5.2.3 Phase d'apprentissage

L'apprentissage est une phase de développement du réseau de neurones durant laquelle le comportement de réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Cette phase nécessite des exemples d'apprentissage et un algorithme d'apprentissage. Le problème d'optimisation consiste à trouver les coefficients du réseau minimisant une fonction d'erreur globale, appelée fonction de coût. Cette optimisation se fait de manière itérative, en modifiant les poids en fonction du gradient de la fonction de coût. L'algorithme d'apprentissage le plus communément utilisé est celui de rétro-propagation de l'erreur (voir Chap 2- § 2.2.3.2). Dans notre cas, l'algorithme de minimisation retenu est de type Levenberg- Marquardt. Ce choix est justifié par le fait que cet algorithme est robuste et permet une convergence plus rapide par la prise en compte des dérivées de second ordre [CHENG, 1996], [LUO, 2007].

5.2.3.1 Expression de la fonction de coût

La fonction la plus couramment utilisée, et dont nous sommes servi lors de cette étude est la fonction dite fonction d'erreur quadratique moyenne (MSE pour Mean Square Error) dont la définition est donnée comme suit :

Soit une base d'apprentissage constituée de N exemples. Pour chaque exemple n ($n \in N$), l'erreur $e(n)$ est calculée comme étant la différence entre la cible $d_i(n)$ et la valeur de sortie de réseau $y_i(n)$ (Equation 5-3).

$$e(n) = d_i(n) - y_i(n) \quad (5-3)$$

Pour tout l'ensemble N de l'apprentissage la fonction erreur MSE est donnée par l'Equation 5-4:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e(n)^2 \quad (5-4)$$

Plus la valeur de cette fonction de coût est petite, plus le modèle reproduit fidèlement les observations utilisées pour l'apprentissage. Le but de l'algorithme d'apprentissage consiste donc à ajuster les poids de réseau afin de réduire cette erreur quadratique à son minimum.

5.2.3.2 L'algorithme de Levenberg- Marquardt

L'algorithme de Levenberg-Marquardt appartient à la classe des méthodes quasi-newtonienne [MORE, 1978]. Il s'agit d'une méthode itérative de minimisation de fonctions qui consiste à modifier les paramètres (θ_k) selon la formule suivante (Equation 5-5) :

$$\theta_{k+1} = \theta_k - [H(\theta_k) + \mu_{k+1}I]^{-1}\nabla J(\theta_k) \quad (5-5)$$

où $H(\theta_k)$ est la matrice Hessienne de la fonction de coût J , I la matrice identité, μ_{k+1} un scalaire appelé pas et $\nabla J(\theta_k)$ le gradient de la fonction de coût.

Le calcul de l'inverse de la matrice $[H(\theta_k) + \mu_{k+1}I]$ peut s'effectuer par des méthodes d'inversion directe.

Cette méthode est particulièrement astucieuse car elle s'adapte d'elle même à la forme de la fonction de coût. Elle effectue un compromis entre la direction du gradient et la direction donnée par la méthode de Newton. En effet, pour de petites valeurs de pas μ_{k+1} , la modification des paramètres correspond à celle de la méthode de Newton, tandis que pour de grandes valeurs de pas, elle tend vers la méthode du gradient simple. En choisissant judicieusement la valeur de pas au cours de l'algorithme, il est donc possible de s'affranchir de la mise en œuvre préalable d'une méthode du gradient simple pour s'approcher de minimum. En effet, cet algorithme est le plus rapide et assure la meilleure convergence vers un minimum de l'erreur quadratique, pour les problèmes d'approximation des fonctions où le nombre de paramètres à optimiser n'est pas très élevé [KIM, 2004].

5.2.3.3 Méthodes pour limiter le sur-apprentissage

Lors de l'entraînement d'un réseau de neurones, on peut se trouver dans une situation de sur-apprentissage, c'est-à-dire une situation dans laquelle le modèle rend très bien compte des mesures employées (base d'apprentissage) pour ajuster ses paramètres, mais ne peut prédire correctement des mesures inconnues. Ainsi, afin d'optimiser la phase d'apprentissage pour que ce phénomène disparaisse, nous avons choisi d'utiliser deux méthodes : la technique d'arrêt prématuré (early stopping) et la technique de régularisation

Bayésienne. Ce choix est justifié par le fait que ces deux méthodes sont les plus souvent utilisées pour améliorer la capacité de généralisation des réseaux de neurones [WANG, 2005].

5.2.3.3.1 Arrêt prématuré

La méthode d'arrêt prématuré consiste à diviser les données disponibles en trois ensembles distincts pour l'apprentissage, la validation et le test. Dans ce cas, le réseau de neurone est entraîné sur l'ensemble d'apprentissage et l'erreur quadratique moyenne entre les cibles (sorties désirées) et les sorties du réseau est calculée. Au fur et au mesure de l'apprentissage, cette erreur quadratique doit diminuer jusqu'au minimum globale de la fonction d'erreur. A la fin de chaque phase d'optimisation des poids, l'erreur quadratique est également évaluée sur l'ensemble de validation afin de contrôler l'apprentissage du réseau. Typiquement, l'évolution de l'erreur quadratique sur les ensembles d'apprentissage et de validation en fonction du nombre de cycles d'apprentissage, se comporte comme montré par la Figure 5-2 ci-dessous.

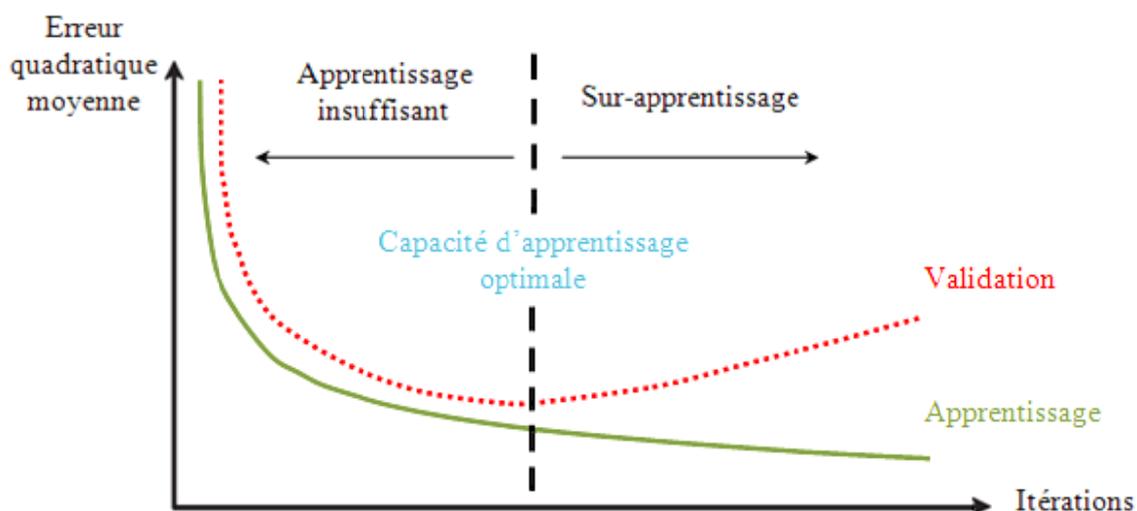


Figure 5- 2: Evolution schématique de l'erreur sur les sous-ensembles d'apprentissage et de validation en fonction du nombre d'itérations

Nous pouvons remarquer que l'erreur sur l'ensemble d'apprentissage décroît continûment au cours du temps puis se stabilise, alors que l'erreur sur l'ensemble de validation ne diminue que jusqu'à un certain point au-delà duquel elle augmente. A partir de ce point, le réseau apprend par cœur les données de l'ensemble de l'apprentissage. Ainsi,

l'apprentissage doit être stoppé même si un minimum de la fonction du coût n'est pas atteint [PRECHELT, 1998].

D'une manière générale, l'apprentissage est arrêté dès que l'erreur sur la base de validation augmente (dès que le réseau entre dans la phase de sur-apprentissage) ou au bout d'un certain nombre d'itérations (nombre que l'on se fixe) quand l'erreur sur la base de validation reste constante depuis un grand nombre d'itérations. Une fois le réseau de neurones entraîné, le troisième ensemble (ensemble de test) peut être utilisé pour évaluer les performances de ce dernier.

Cette méthode est rapide et facile à mettre en œuvre. Cependant, elle nécessite d'avoir suffisamment de données pour constituer trois bases à la fois représentatives et distinctes.

5.2.3.3.2 Régularisation Bayésienne

La méthode de régularisation Bayésienne consiste à modifier la fonction de coût (MSE) en lui ajoutant un terme de régularisation (MSW) égal à la somme des carrés des poids (W_{ij}) et des biais (b_k), afin de pénaliser les valeurs absolues élevées des poids et éviter ainsi le phénomène de sur-apprentissage [DREYFUS, 2002]. On obtient donc une fonction du coût MSE « régulée » (MSE_{reg}) qui est donnée comme suit (Equation 5-6):

$$MSE_{reg} = \gamma MSE + (1 - \gamma)MSW \quad (5-6)$$

avec,

$$MSW = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} w_j^2 \quad (5-7)$$

où γ est un scalaire positif qui pondère l'importance des valeurs des poids sur l'erreur quadratique moyenne, N_p le nombre de paramètres du réseau et w_j un des poids W_{ij} ou des biais b_k du réseau de neurones.

Ainsi, la régularisation Bayésienne minimise la combinaison linéaire de MSE_{reg} pour obtenir une valeur optimale de γ . Cette modification provoque une diminution des poids et biais et force le réseau à avoir une bonne réponse, en évitant le sur-apprentissage. La régularisation est résolue avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt [MACKAY,

1992]. Ce dernier assure une mesure du nombre de paramètres (poids et biais) effectivement utilisés par le réseau.

Cette méthode est souvent utilisée, car elle est très simple à mettre en œuvre, et ne nécessite pas l'utilisation d'un ensemble de validation pour contrôler l'apprentissage de réseau.

5.2.4 Généralisation

Une fois les poids de chaque connexion du réseau optimisés, il faut mesurer les performances du réseau sur une base de données différente de celle utilisée pour l'apprentissage ou la validation. Ce test permet à la fois d'apprécier les performances de système neuronal et de détecter le type de données qui pose problème. Si les performances ne sont pas satisfaisantes, il faudra soit modifier l'architecture du réseau, soit modifier la base d'apprentissage (caractéristiques discriminantes ou représentativité de données de chaque classe) [LARSEN, 1999]. Les performances du modèle établi peuvent être mesurées à l'aide de divers indicateurs statistiques présentés plus loin dans ce chapitre. Les résultats obtenus servent alors à déterminer la capacité de réseau à généraliser sur des autres exemples.

Dans cette partie, nous avons montré que la phase d'apprentissage doit être menée avec attention. En effet, le phénomène de sur-apprentissage doit être évité pour assurer des bonnes performances en généralisation. Dans la partie suivante, nous nous intéressons à décrire la méthodologie suivie pour optimiser l'architecture des réseaux de neurones.

5.2.5 Optimisation de l'architecture

L'optimisation de l'architecture de réseau de neurones est nécessaire pour que celle-ci soit représentative de la complexité du modèle à identifier. Il s'agit de trouver le nombre optimal des couches cachées et le nombre de neurones par couche pour que le modèle exprime fidèlement la variation de la réponse. Dans ce cadre, de nombreux auteurs considèrent qu'il n'y a pas des règles pour définir l'architecture optimale de réseau et que seule l'expérimentation le permet [GOH, 1995], [KAASTRA, 1996], [SENTIES, 2007].

Dans notre cas, l'architecture du réseau a été fixée à une seule couche cachée (§ 5.2.2). Pour optimiser cette architecture, les deux étapes suivantes sont appliquées:

5.2.5.1 Détermination du nombre de neurones pour la couche cachée

Le nombre de neurones cachés joue un rôle primordial dans le contrôle de la capacité du réseau des neurones [PARK, 1996]. Si ce nombre est trop petit, alors le réseau dispose de très peu de paramètres et n'a pas assez de flexibilité pour apprendre les données correctement : le réseau ne reproduit correctement ni les données d'apprentissage, ni les données de test. C'est une situation qu'on appelle le sous-apprentissage ou sous-ajustement. Par contre, si l'on choisit une valeur trop grande pour le nombre de neurone cachés, le nombre de paramètres du modèle augmente. Le réseau dispose donc trop de flexibilité (trop de degré de liberté) et il l'utilise pour apprendre toutes les particularités des données, c'est ce qu'on appelle le sur-apprentissage, apprentissage au cœur, overfitting ou bien sur-ajustement [KAASTRA, 1996]. Un tel phénomène entraîne une erreur importante sur les nouvelles données prédites bien que les données d'entraînement du réseau s'ajustent bien. Le choix d'un nombre approprié de neurones dans la couche cachée est donc nécessaire pour reproduire correctement les données d'apprentissage et disposer de facultés de généralisation sur les données de test.

En pratique, le nombre de neurones cachés est déterminé de façon empirique par essais successifs jusqu'à l'obtention de performances satisfaisantes [WONG, 2003], [HUI, 2004], [WANG, 2007c], [SENTIES, 2007]. Cependant, certains auteurs ont défini des règles empiriques pour fixer ce nombre [LENARD, 1995], [PIRAMUTHU, 1994], [WANG, 1994]. Selon ces règles, la taille de la couche cachée doit être soit égale à celle de la couche d'entrée, soit égale à 75 % de celle-ci ou bien égale à la racine carrée du produit des nombres dans la couche d'entrée et de sortie. Un autre critère, qui restreint fortement le nombre de neurones cachés, consiste à vérifier que le nombre de paramètres du modèle soit inférieur à la taille du jeu de données d'apprentissage [BRATLETT, 1997], [WEIGNED, 1990], [AMARI, 1997].

Pour déterminer automatiquement le nombre optimal de neurones cachés pour un problème posé, une autre approche proposée a consisté de procéder à l'estimation d'un

réseau comportant un grand nombre de neurones cachés puis à le simplifier par une règle d'apprentissage éliminant les neurones les moins significatifs [COTTREL, 1995], [YEUNG, 2002], [LIANG, 2007], [THOMAS, 2008], [ZENG, 2009], [LIVINGSTON, 1997]. D'autres auteurs ont proposé de construire de manière itérative la couche cachée [KWOK, 1997], [RIVALIS, 2003], [REN, 2003], [ALAM, 2004], [MA, 2003].

Dans notre cas, nous avons élaboré un algorithme itératif pour déterminer le nombre optimal de neurones cachés (Figure 5-3). Le principe de cet algorithme consiste à partir d'un réseau de neurone comportant un seul neurone dans la couche cachée, de réaliser l'apprentissage de réseau en utilisant un nombre fixe d'itérations (par exemple 50), et, d'augmenter progressivement le nombre de neurones cachés d'une unité à chaque fois, jusqu'à satisfaire les critères de performance choisis. A chaque nouvelle addition d'une unité cachée, les performances du réseau en apprentissage et généralisation sont évaluées à l'aide de deux indicateurs statistiques : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de régression linéaire (R). Le nombre de neurones cachés est considéré optimal lorsque ces indicateurs vérifient les deux règles d'arrêt suivantes:

1. Les racines carrées de l'erreur quadratique moyenne sur les ensembles d'apprentissage ($RMSE_{Appr}$) et de test ($RMSE_{Test}$) sont de même ordre de grandeur et les plus petites que possible.
2. les coefficients de corrélation sur l'ensemble d'apprentissage (R_{Appr}) et l'ensemble de test (R_{Test}) sont proches de 1.

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne commise sur la base d'apprentissage est donnée par l'Equation 5-8 :

$$RMSE_{Appr} = \sqrt{\frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^{N_A} (d_i - y_i)^2} \quad (5-8)$$

où N_A est le nombre d'exemples constituant l'ensemble d'apprentissage du modèle, d_i la cible (sortie désirée) et y_i la sortie calculée par le réseau.

Cette grandeur constitue une première estimation de la qualité de l'apprentissage réalisé. Cependant, elle doit être comparée à la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne sur la base de test (Equation 5-9) :

$$RMSE_{Test} = \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} (d_i - y_i)^2} \quad (5-9)$$

où N_T est le nombre d'exemples constituant l'ensemble de test du modèle.

Cela constitue une seconde vérification pour prévenir le sur-apprentissage. La différence entre l'erreur d'apprentissage et l'erreur de généralisation représente une mesure de la qualité de l'apprentissage effectué. En effet, dans le cas où $RMSE_A$ est très faible et $RMSE_T$ est très élevée, cela signifie que le réseau de neurones ne généralise pas dans des bonnes conditions. Il a parfaitement appris sur les données d'apprentissage mais est défaillant sur des nouvelles données. Ainsi, le meilleur modèle est celui qui possède des erreurs $RMSE_A$ et $RMSE_T$ les plus petites possibles et ayant le même ordre de grandeur. De ce fait, le rapport $\left(\frac{RMSE_{Test}}{RMSE_{Appr}}\right)$ doit être proche de 1. Dans ce travail, nous estimons que ce rapport doit être délimité par un certain seuil β afin d'obtenir un bon ajustement du modèle.

Les valeurs des coefficients de corrélation (R) sont obtenues en calculant les coefficients des lignes de régression qui relient les valeurs de sortie du réseau de neurones avec leurs cibles correspondantes. De telles valeurs sont considérées comme bonnes lorsqu'elles sont strictement supérieures à 0,85.

5.2.5.2 Détermination du nombre d'itérations

Le nombre d'itérations (epochs) est un paramètre important pour évaluer la qualité de l'apprentissage du modèle. En général, ce paramètre est choisi de manière aléatoire. Dans cette section, nous présentons un algorithme complémentaire (Figure 5-4). Le but de cet algorithme consiste à déterminer le nombre d'itérations optimal qui permet une amélioration des performances du modèle obtenu précédemment. Il est basé sur la même procédure itérative. Cette fois-ci, le nombre optimal de neurones cachés est utilisé pour fixer l'architecture de réseau. Au début, l'apprentissage du modèle est réalisé en utilisant

un nombre initial d'itérations (n_0). Ensuite, ce nombre est incrémenté de k itérations à chaque fois. La procédure itérative sera terminée lorsque la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne et le coefficient de corrélation sur les bases d'apprentissage et de test sont meilleurs que ceux du modèle obtenu dans la section précédente. Il est à noter ici que les valeurs de n_0 et k peuvent être choisies de manière à s'adapter à la complexité du problème traité.

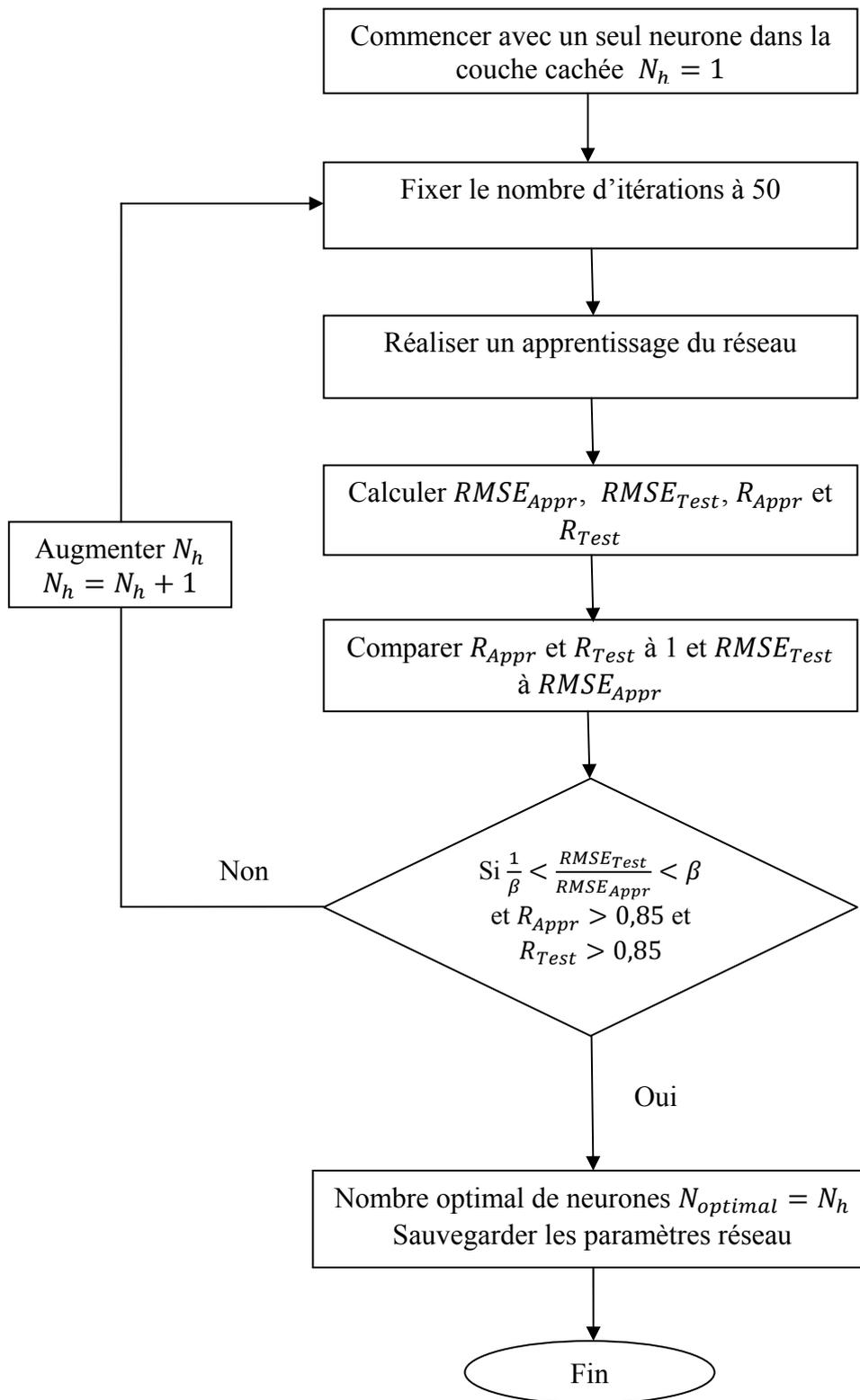


Figure 5- 3 : Organigramme pour la détermination du nombre optimal de neurones cachés

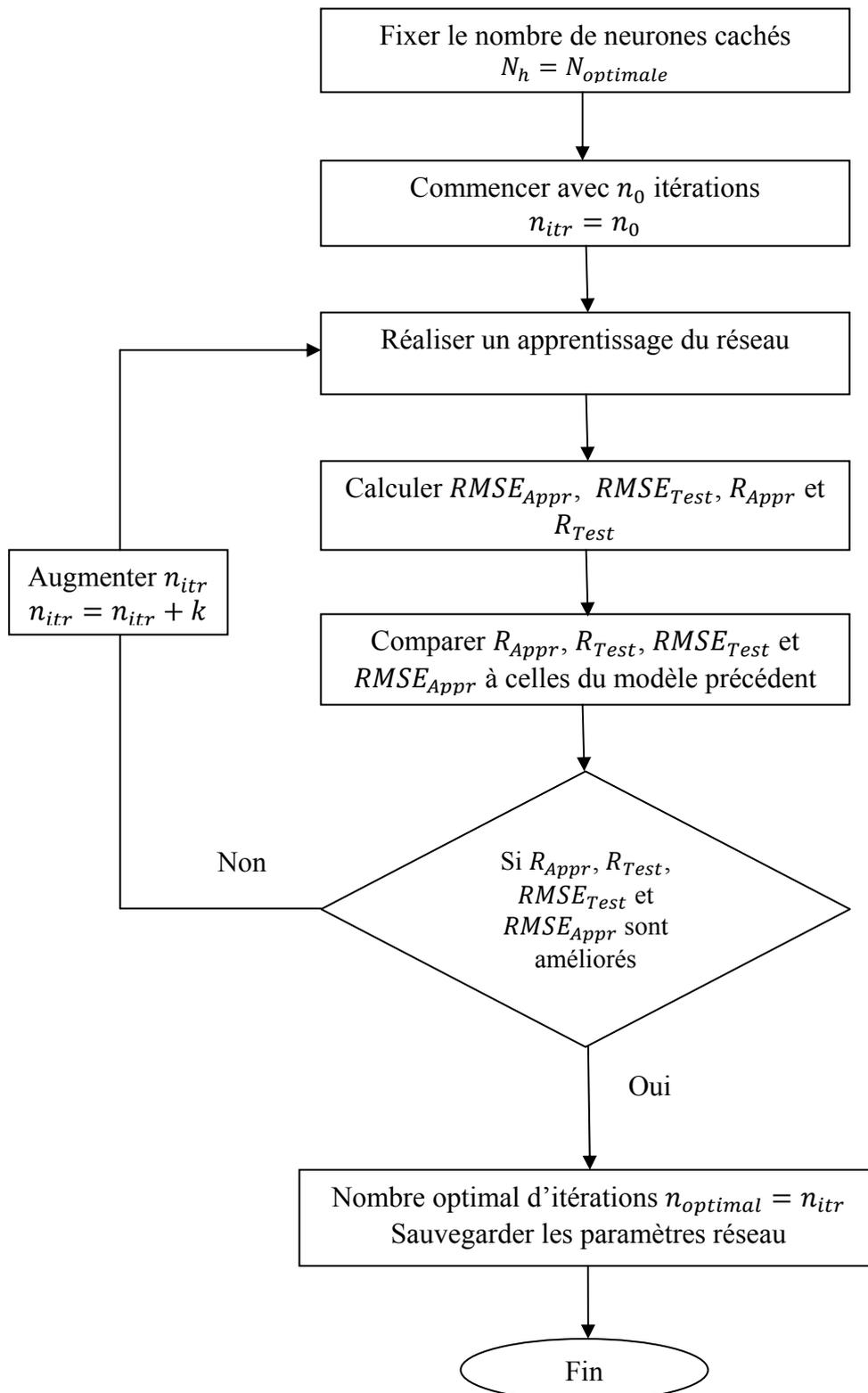


Figure 5- 4 : Organigramme pour la détermination du nombre optimal d'itérations

Après avoir déterminé la structure des réseaux de neurones, nous allons présenter dans la partie suivante les critères qui vont nous permettre d'évaluer les performances de ces réseaux.

5.2.6 Détermination des performances des modèles

Nous avons vu précédemment que pour déterminer le nombre optimal de neurones cachés et d'itérations, nous avons recours à deux indicateurs statistiques : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation (R). Une fois le modèle optimal choisi, nous allons utiliser ces deux indicateurs ainsi que l'erreur absolue moyenne (MAE pour Mean Absolute Error) et l'erreur relative absolue moyenne (RMAE pour Relative Mean Absolute Error) pour évaluer ses performances globales.

5.2.6.1 Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne est utile pour pouvoir comparer plusieurs réseaux de neurones entre eux puisqu'elle permet d'évaluer les performances globales du modèle en terme de généralisation. Elle est calculée comme suit (Equation 5-10).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2} \quad (5-10)$$

où N est le nombre d'exemples utilisés, d_i les valeurs mesurées et y_i les valeurs estimées par le modèle.

5.2.6.2 Coefficient de corrélation (R)

Le coefficient de corrélation R permet de mesurer la qualité de la corrélation. Ce paramètre reflète le degré avec lequel la variable observée est correctement estimée par le modèle. La prédiction sera d'autant meilleure que R sera proche de 1. Le calcul de cet indicateur a été effectué à l'aide de la fonction « *postreg* » de la boîte à outils Matlab.

5.2.6.3 Erreur absolue moyenne (MAE)

L'erreur absolue moyenne représente la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts. Ce paramètre est intéressant car il nous donne un indice de la différence entre la réalité et la prédiction moyenne du réseau. Il est calculé comme suit (Equation 5-11):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d_i - y_i| \quad (5-11)$$

5.2.6.4 Erreur relative absolue moyenne (MRAE)

L'erreur relative absolue moyenne permet d'estimer la précision sur le résultat obtenu. Elle est calculée selon l'Equation 5-12 :

$$MRAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|d_i - y_i|}{d_i} \quad (5-12)$$

Ce paramètre n'a pas d'unité. Il s'exprime généralement en %.

5.2.7 Récapitulatif

La Tableau 5-1 résume les différentes étapes liées à la mise en œuvre des modèles neuronaux.

Rubrique		Critère retenu pour cette étude
Méthode de sélection de variables d'entrée		Critère de sensibilité flou
Normalisation des données		Chaque variable est normalisée de telle sorte qu'elle aura une moyenne nulle et un écart type égal à l'unité
Découpage de la base de données		Ensemble 1 : apprentissage pour optimiser les poids des connexions Ensemble 2 : test pour évaluer les performances des modèles
Type d'architecture		Perceptron multicouches
Nombre de couches cachées		Une seule couche cachée
Nombre de neurones	Couche d'entrée	Nombre des paramètres d'entrée
	Couche cachée	Il sera déterminé au cours de processus d'optimisation
	Couche de sortie	Nombre des paramètres de sortie
Fonction d'activation	Couche cachée	Tangente hyperbolique
	Couche de sortie	Linéaire (l'identité)
Algorithme d'optimisation		Levenberg-Marquardt (second ordre)
Techniques pour limiter le sur-apprentissage		Arrêt prématuré : une partie des données d'apprentissage sera utilisée pour la validation. Régularisation Bayésienne
Nombre d'itérations		Il sera déterminé au cours de processus d'optimisation
Indicateurs statistiques		RMSE, MAE, RMAE, R

Tableau 5- 1 : Choix faits concernant la construction de l'architecture des réseaux de neurones

Le processus d'optimisation de la structure des réseaux de neurones peut être résumé par l'organigramme de la Figure 5-5.

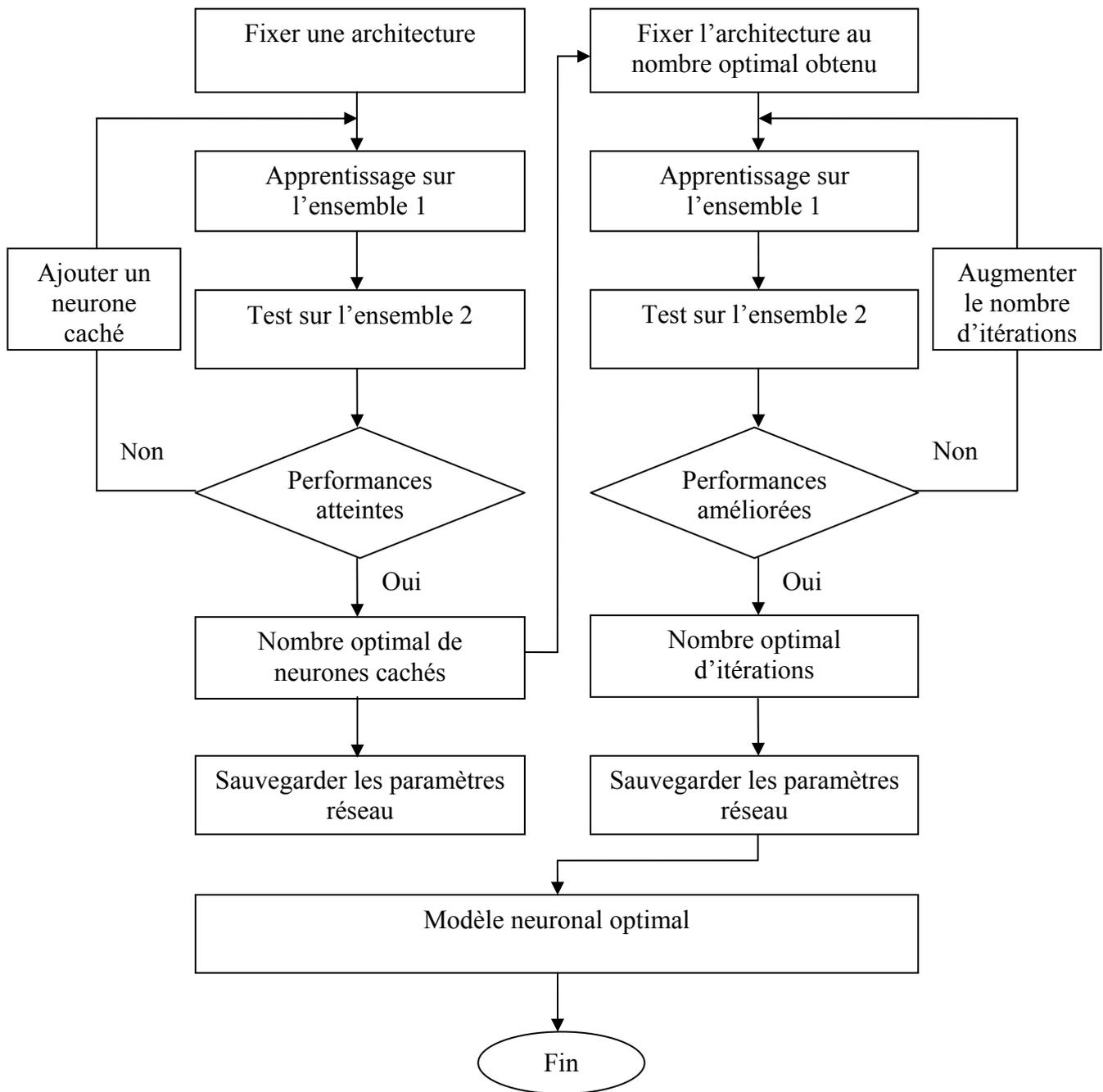


Figure 5- 5 : Processus d'optimisation

Dans ce qui suit, nous allons appliquer la méthodologie qui vient d'être décrite au procédé plasma.

5.3 Application au procédé plasma

Afin d'établir les modèles des réseaux de neurones, nous avons utilisé le logiciel MATLAB 7 au cours de la phase de la conception et de l'optimisation. Ce logiciel contient une boîte à outils consacrée au développement de réseaux de neurones.

5.3.1 Base de données utilisée

Pour déterminer les paramètres d'entrée pertinents des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma, nous avons utilisé le critère de sensibilité flou et appliqué l'algorithme proposé (*Chap 2 - § 2.3.3*). Les résultats de cette application ont été présentés dans le Chapitre 4 (*Chap 4 - § 4.2*). Il a été mis en évidence que la puissance électrique, la vitesse de traitement, la matière, la finesse des fibres, la perméabilité à l'air, l'armure et la densité des pics sont les paramètres d'entrée les plus influents sur le cosinus de l'angle de contact et la hauteur capillaire des tissus. Ainsi, nous avons établi une base de données regroupant les variations de ces deux sorties en fonction des valeurs des paramètres sélectionnés. Cette base de données sera utilisée afin procéder à l'apprentissage des réseaux de neurones et d'obtenir des prédictions sur le procédé plasma. Les paramètres qualitatifs (matière, armure) ont été transformés en variables binaires [0-1]. Le Tableau 5-2 illustre les bornes retenues pour chaque paramètre d'entrée.

Paramètre	Minimum	Maximum	CV (%)	Unités
Puissance électrique	300	1000	47,78	Watt
Vitesse de traitement	2	10	56,12	m/s
Matière	0 (100% polyester)	1 (100% viscose)	-	-
Finesse des fibres	0,9	1,7	26,37	dtex
Perméabilité à l'air	20	3315	166,05	l/m ² s
Armure	0 (toile)	1 (sergé 3/1)	-	-
Densité des pics	995	2307	25,38	pics/mm ²

Tableau 5- 2 : Domaine de variations des paramètres d'entrée du procédé plasma

Avant d'être injectées dans le réseau de neurones, les données sont tout d'abord normalisées de manière à avoir une moyenne nulle et un écart type égal à l'unité. Ensuite, elles sont réparties de façon aléatoire en deux ensembles: un ensemble permettant d'effectuer l'apprentissage du réseau et un autre permettant de tester les prédictions faites

par ce réseau. Sur l'ensemble de la base de données, 75 % des données (102 exemples) seront utilisés pour l'entraînement de réseau de neurones, dont 1/3 (34 exemples) permettront de valider le réseau au cours de l'apprentissage si la technique d'arrêt prématuré est utilisée. Le 25 % restant des données (34 exemples) seront destinés à tester le réseau de neurones lorsque l'apprentissage sera fini. L'objectif est en effet de vérifier si le réseau de neurones est capable de généraliser et de prédire des valeurs pour des exemples pour lesquels il n'était pas entraîné.

5.3.2 Résultats de l'optimisation de l'architecture des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones mis en œuvre sont constitués de trois couches : une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. Ces réseaux comportent sept entrées et deux sorties qui correspondent respectivement aux paramètres d'entrée et de sortie du procédé plasma. Le nombre de neurones cachés n'est pas fixé à priori. Il sera déterminé pendant la phase d'apprentissage. La fonction d'activation utilisée pour les neurones de la couche cachée est la fonction tangente hyperbolique, et celle pour les neurones de sortie est l'identité.

L'entraînement des réseaux de neurones développés a été effectué sur la même base de données, en utilisant deux techniques de régularisation différentes : la technique d'arrêt prématuré et la technique de régularisation Bayésienne. Lorsque la première technique est utilisée, l'apprentissage du réseau est effectué par l'algorithme *trainlm* de Levenberg-Marquardt, qui est disponible dans l'outil "réseaux de neurones" de Matlab. Cependant, lorsque la deuxième technique est utilisée, le réseau est entraîné par l'algorithme de Levenberg-Marquardt modifié, *trainbr*. Ce dernier correspond à la version de *trainlm* avec modération automatique des poids.

5.3.2.1 Nombre de neurones cachés

Pour déterminer le nombre de neurones cachés, nous avons appliqué l'algorithme présenté dans le paragraphe § 5.2.5.1. Le principe de cet algorithme consiste à créer un réseau de taille minimale auquel on ajoute une à une des unités supplémentaires jusqu'à atteindre les critères d'arrêt spécifiés. En fait, le nombre des neurones cachés est considéré

optimal lorsque les racines carrées de l'erreur quadratique moyenne sur les ensembles d'apprentissage et de test sont de même ordre de grandeur et les plus petites que possibles et les coefficients de corrélation sont proches de 1. Le seuil d'apprentissage a été fixé à 0,001. Le nombre d'itérations maximum a été fixé à 50. Quand au seuil β , il a été fixé à 1,5. Le Tableau 5-3 présente les résultats relatifs au nombre de neurones cachés concernant les deux cas d'apprentissage.

Technique de régularisation		Arrêt prématuré	Régularisation Bayésienne
Paramètre			
Nombre optimal d'unités cachées		9	7
Sortie 1 : Cosinus de l'angle de contact	$RMSE_{Appr}$	0,0234	0,0177
	$RMSE_{Test}$	0,0307	0,022
	R_{Appr}	0,9897	0,9938
	R_{Test}	0,9853	0,9893
	$RMSE_{Test}/RMSE_{Appr}$	1,31	1,25
Sortie 2: Hauteur capillaire	$RMSE_{Appr}$ (mm)	1,2353	1,041
	$RMSE_{Test}$ (mm)	1,726	1,2252
	R_{Appr}	0,9945	0,9961
	R_{Test}	0,9906	0,9954
	$RMSE_{Test}/RMSE_{Appr}$	1,4	1,18

Tableau 5- 3 : Résultats relatifs au nombre de neurones cachés pour les deux cas d'apprentissage

Le nombre de neurones cachés est alors fixé à 9 lorsque la technique d'arrêt prématuré est utilisée et à 7 lorsque la technique de régularisation Bayésienne est utilisée. Ainsi, dans le premier cas, l'architecture du réseau de neurones obtenu inclut 7 neurones en entrée, 9 neurones cachés et deux neurones de sortie. La Figure 5-6 montre une représentation symbolique de cette architecture.

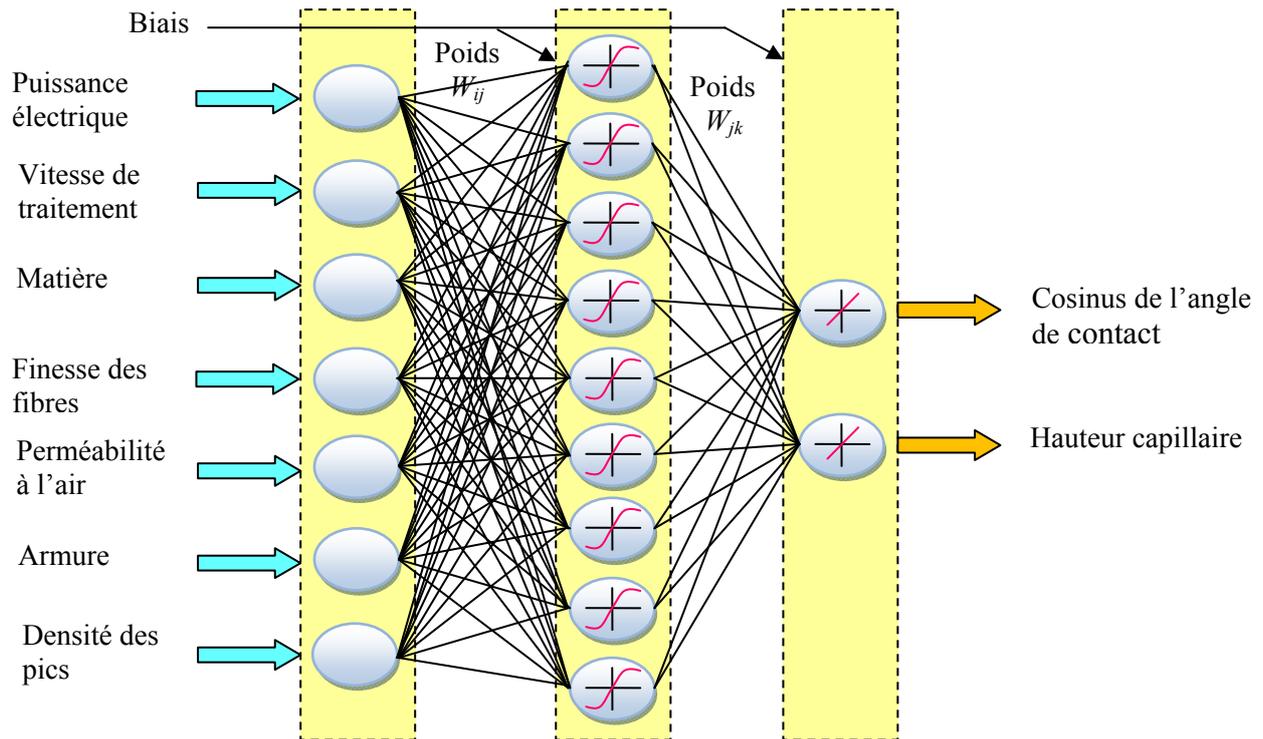


Figure 5- 6 : Architecture du réseau de neurones obtenu en utilisant la technique d'arrêt prématuré

Dans le second cas, l'architecture du réseau obtenu inclut 7 neurones en entrée, 7 neurones cachés et deux neurones de sortie. Une représentation symbolique de cette architecture est donnée par la Figure 5-7.

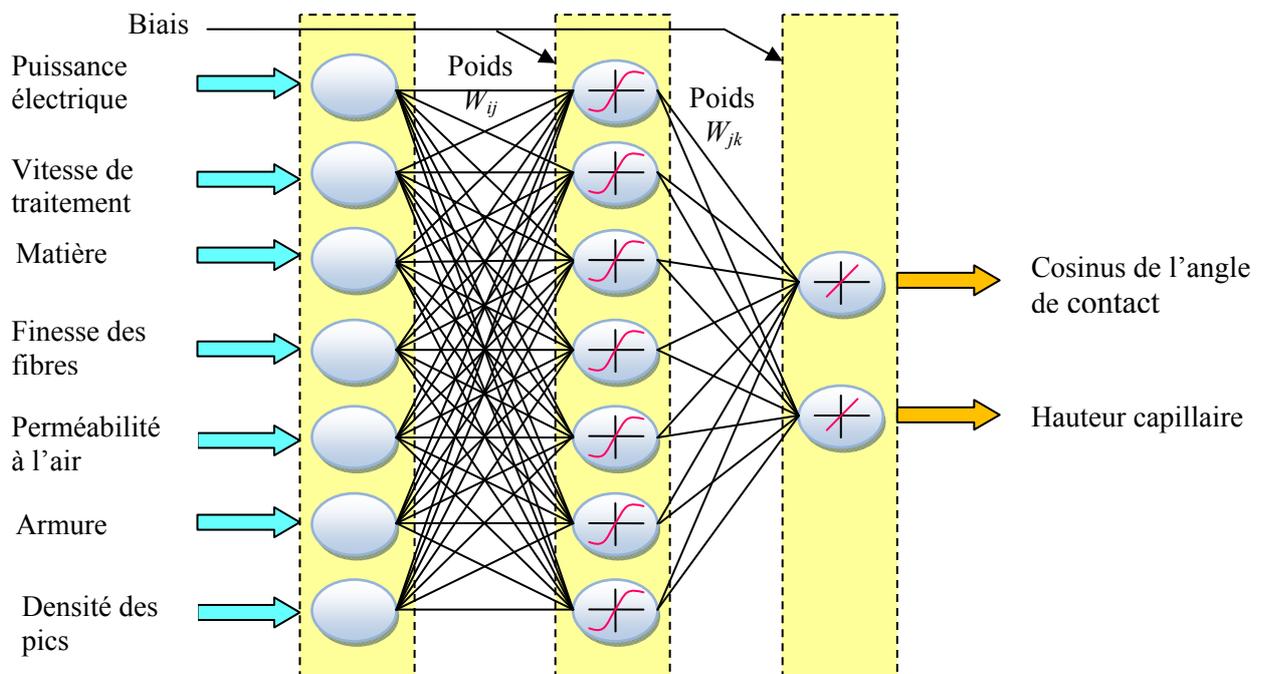


Figure 5- 7 : Architecture du réseau de neurones obtenu en utilisant la technique de régularisation Bayésienne

Une fois le nombre de neurones cachés est fixé, nous allons déterminer, dans la section suivante, le nombre optimal d'itérations qui va permettre d'améliorer les performances des réseaux de neurones obtenus.

5.3.2.2 Nombre d'itérations

Pour déterminer le nombre optimal d'itérations, nous avons appliqué l'algorithme présenté dans le paragraphe § 5.2.5.2. En utilisant cet algorithme, l'architecture de réseaux de neurones a été fixée en utilisant le nombre optimal de neurones obtenu précédemment. Cependant, le nombre initial d'itérations n_0 a été fixé à 50. Ensuite, ce nombre a été incrémenté de 10 itérations ($k = 10$) à chaque fois. La procédure itérative est arrêtée lorsque les performances des modèles de réseaux de neurones sont améliorées. Les résultats obtenus sont illustrés par le Tableau 5-4.

Paramètre		Technique de régularisation	Arrêt prématuré	Régularisation Bayésienne
Nombre optimal d'itérations			110	250
Sortie 1 : Cosinus de l'angle de contact	RMSE _{Appr}		0,0156	0,0107
	RMSE _{Test}		0,0208	0,0137
	R _{Appr}		0,9952	0,9977
	R _{Test}		0,9920	0,9957
	RMSE _{Test} /RMSE _{Appr}		1,33	1,28
Sortie 2: Hauteur capillaire	RMSE _{Appr}		1,0699	0,8555
	RMSE _{Test}		1,2164	1,0151
	R _{Appr}		0,9959	0,9973
	R _{Test}		0,9952	0,9964
	RMSE _{Test} /RMSE _{Appr}		1,14	1,19

Tableau 5- 4 : Résultats relatifs au nombre d'itérations pour les deux cas d'apprentissage

D'après ce tableau, nous constatons que le nombre optimal d'itérations correspond à 110 itérations dans le premier cas d'apprentissage et à 250 itérations dans le deuxième

cas. En comparant les Tableaux 5-3 et 5-4, nous pouvons remarquer que les performances de deux modèles obtenus sont améliorées.

Dans tout ce qui suit, le modèle obtenu dans le premier cas sera appelé « modèle LM » et celui obtenu dans le second cas, « modèle BR ». Les caractéristiques de ces modèles sont résumés dans le Tableau 5-5.

Paramètre		Modèle LM	Modèle BR
Nombre de couches cachées		1	1
Base de données	Apprentissage	102 exemples dont 34 sont utilisés pour la validation	102 exemples
	Test	34 exemples	34 exemples
Technique utilisée pour limiter le sur-apprentissage		Arrêt prématuré	Régularisation Bayésienne
Algorithme d'optimisation		Levenberg-Marquardt "trainlm"	Levenberg-Marquardt modifié "trainbr"
Nombre de neurones	Couche d'entrée	7	7
	Couche cachée	9	7
	Couche de sortie	2	2
Fonctions de transfert	Couche cachée	Tangente hyperbolique « tansig »	Tangente hyperbolique « tansig »
	Couche de sortie	Linéaire « purelin »	linéaire « purelin »
Nombre d'itérations		110	250

Tableau 5- 5 : Caractéristiques des modèles obtenus

5.3.3 Comparaison des modèles obtenus

Dans cette partie, nous proposons un comparatif des performances entre les deux modèles obtenus en termes d'apprentissage et de test afin de déterminer quel est le meilleur modèle.

5.3.3.1 Apprentissage

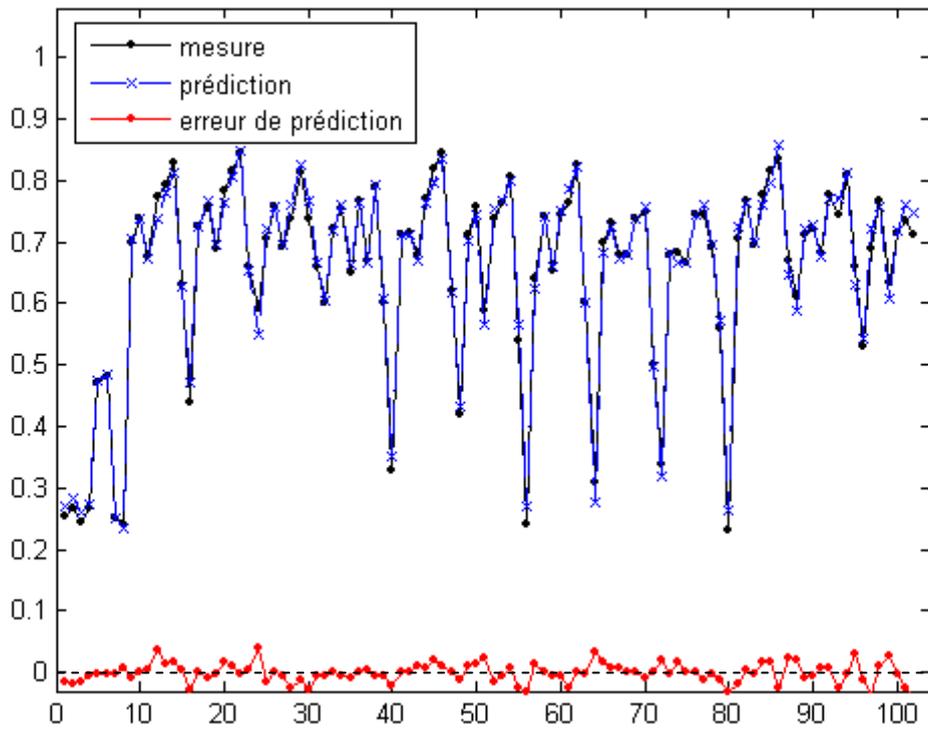
Pour étudier la qualité de l'apprentissage de deux modèles obtenus, nous avons utilisé quatre critères de performance qui sont respectivement la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur relative absolue moyenne (MRAE) et le coefficient de corrélation (R). Les valeurs de ces paramètres ont été déterminées comme indiqué dans le paragraphe § 5.2.6, à partir de la totalité des données d'apprentissage. Le Tableau 5-6 illustre les résultats obtenus.

Sortie Critère	Modèle LM		Modèle BR	
	Cosinus de l'angle de contact	Hauteur capillaire	Cosinus de l'angle de contact	Hauteur capillaire
RMSE	0,0156	1,0699 mm	0,0107	0,8555 mm
MAE	0,0119	0,8856 mm	0,0087	0,6600 mm
MRAE	2,18 %	4,82 %	1,46 %	3,92 %
R	0,9952	0,9959	0,9977	0,9973

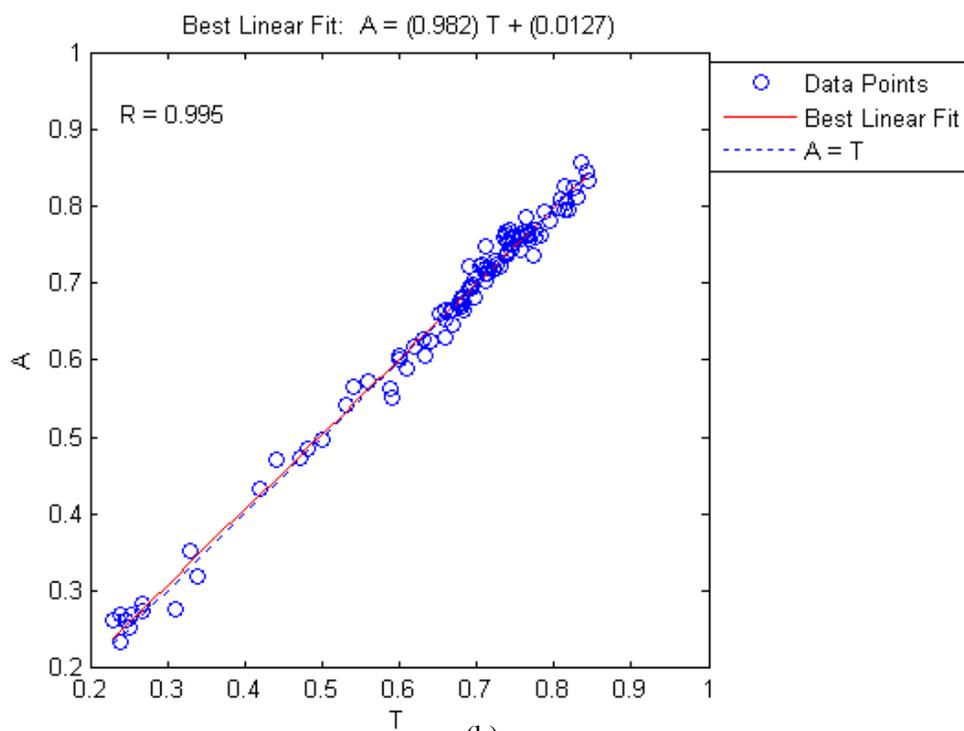
Tableau 5- 6 : Performances de deux modèles sur les données d'apprentissage

Les Figures 5-8 et 5-9 présentent les valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact ainsi que l'erreur de prédiction et le diagramme de parité correspondant (graphique représentant la sortie calculée en fonction de la sortie désirée), sur l'ensemble d'apprentissage respectivement pour le modèle LM et le modèle BR. L'erreur de prédiction correspond à l'écart entre les valeurs mesurées et prédites par le modèle.

Les Figure 5-10 et 5-11 présentent les mêmes types de résultats pour la hauteur capillaire.

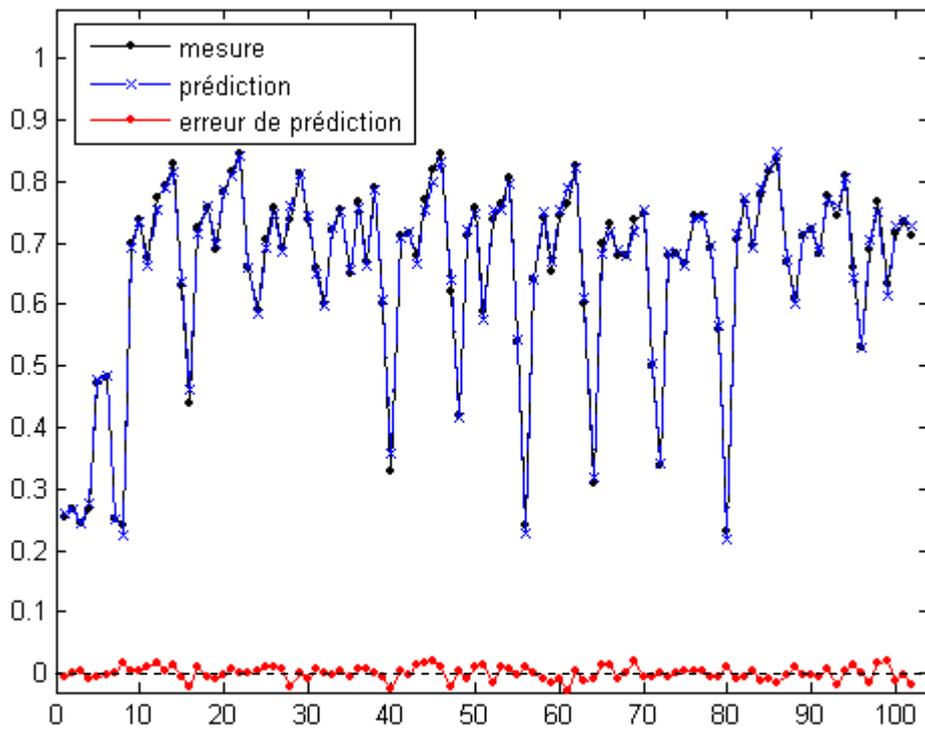


(a)

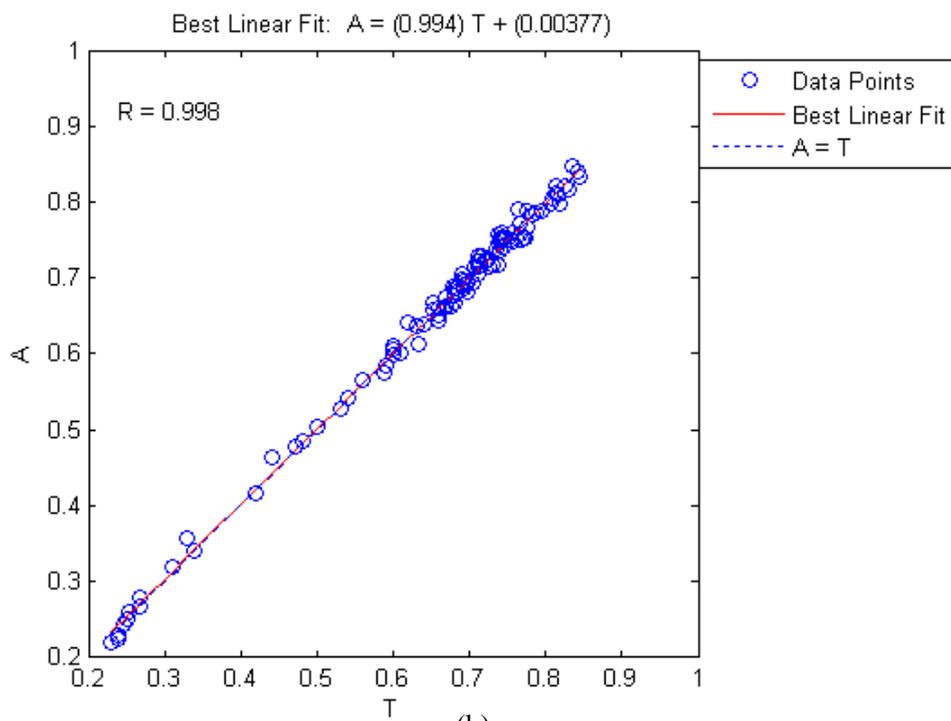


(b)

Figure 5- 8 : (a) Valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact et erreur de prédiction sur l'ensemble d'apprentissage pour le modèle LM ; (b) Diagramme de parité correspondant

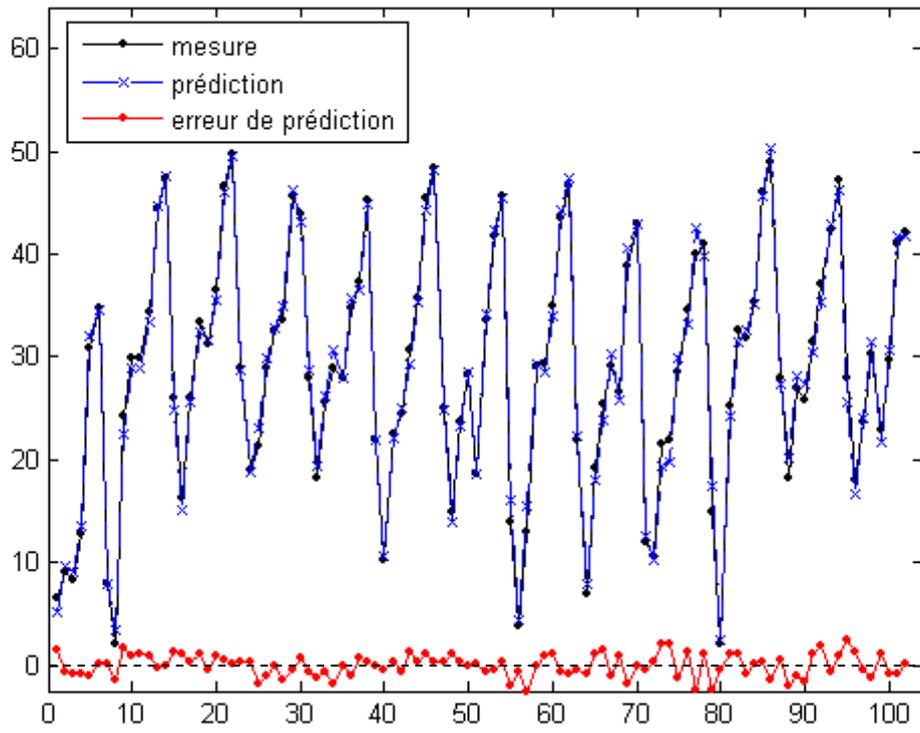


(a)

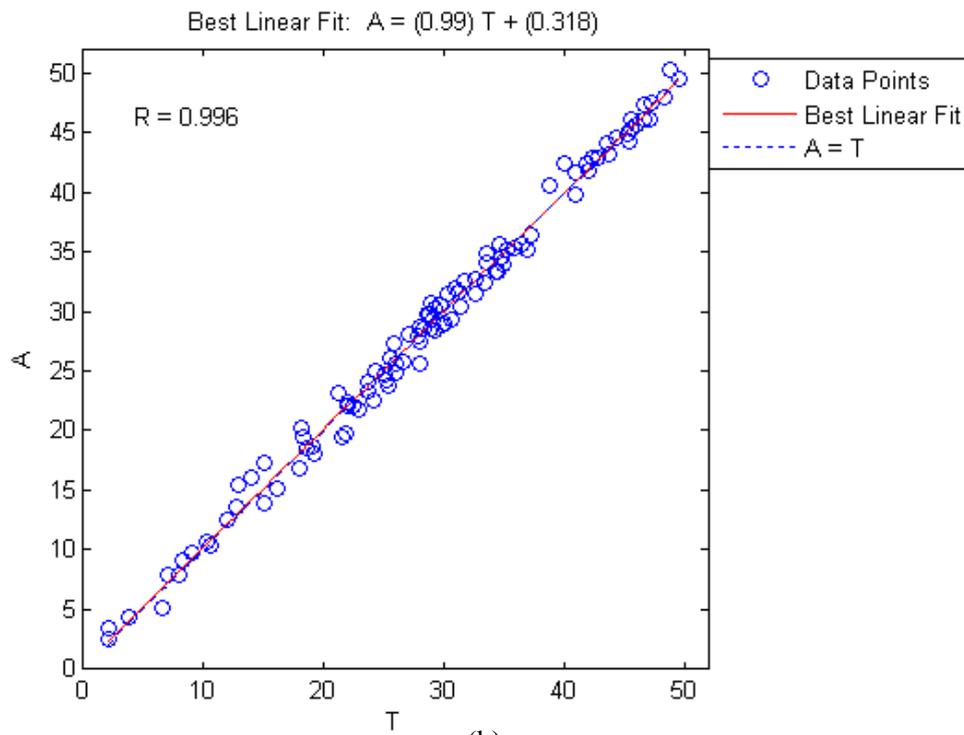


(b)

Figure 5- 9 : (a) Valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact et erreur de prédiction sur l'ensemble d'apprentissage pour le modèle BR ; (b) Diagramme de parité correspondant



(a)



(b)

Figure 5- 10 : (a) Valeurs mesurées et prédites de la hauteur capillaire et erreur de prédiction sur l'ensemble d'apprentissage pour le modèle LM ; (b) Diagramme de parité correspondant

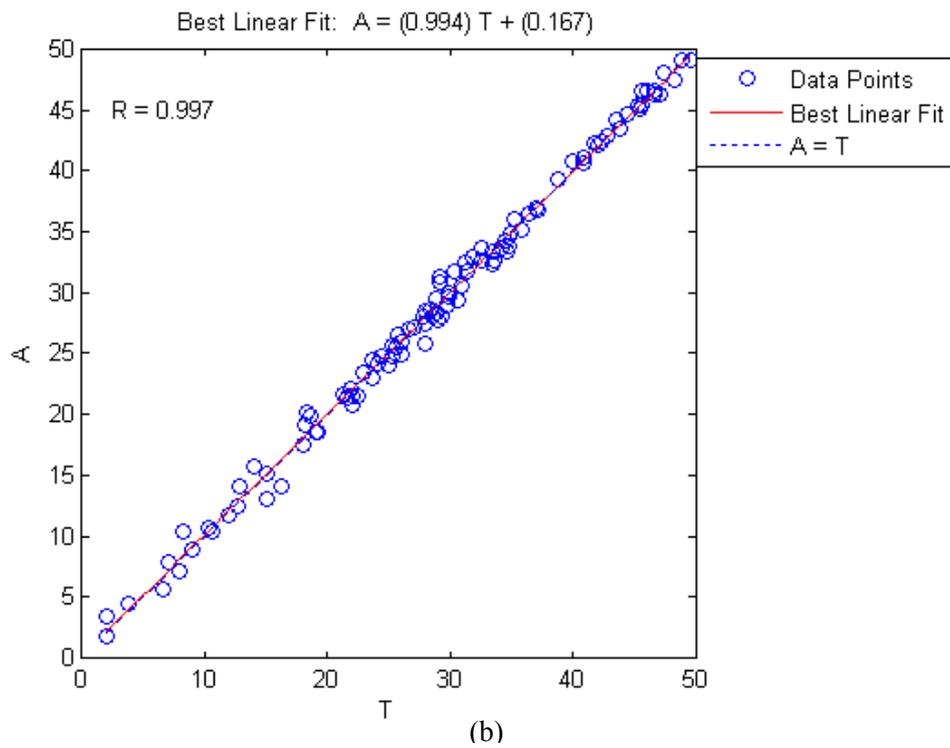
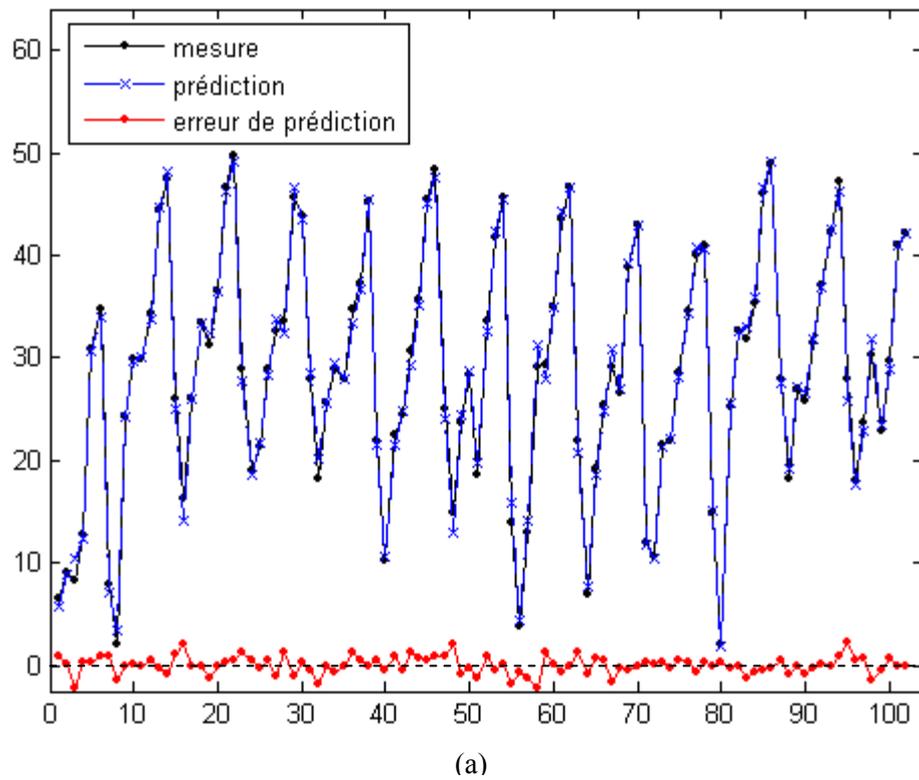


Figure 5- 11: (a) Valeurs mesurées et prédites de la hauteur capillaire et erreur de prédiction sur l'ensemble d'apprentissage pour le modèle BR ; (b) Diagramme de parité correspondant

Nous pouvons remarquer que la corrélation entre les valeurs du cosinus de l'angle de contact mesurées et prédites par le modèle BR (Figure 5-9) est légèrement plus élevée que celle obtenue par le modèle LM (Figure 5-8). De même, nous pouvons constater que l'erreur de prédiction est moins importante dans le cas du modèle BR. En fait, la valeur de R obtenue pour ce modèle est de 0,998 avec une erreur absolue moyenne de 0,0087 et une erreur relative absolue moyenne de 1,46 %. Cependant, pour le modèle LM, la corrélation est de 0,995 avec une erreur absolue moyenne (MAE) de 0,0119 et une erreur relative absolue moyenne (RMAE) de 2,18 % (Tableau 5-6). Les mêmes observations peuvent être notées pour la hauteur capillaire. En effet, comme l'indique le Tableau 5-6, le coefficient de corrélation entre les valeurs de la hauteur capillaire calculées et prédites par le modèle BR est de 0,997 avec une erreur absolue moyenne de 0,66 mm et une erreur relative absolue moyenne de 3,92 % (Figure 5-11). Cependant, pour le modèle LM, la corrélation est de 0,996 avec une erreur absolue moyenne de 0,8856 mm et une erreur relative absolue moyenne de 4,82 % (Figure 5-10). Toutefois, ces deux modèles donnent tous les deux des prédictions assez proches des données expérimentales. Ces résultats témoignent donc de leur capacité à reproduire les données connues de l'apprentissage pour les deux paramètres de sortie (cosinus de l'angle de contact, hauteur capillaire).

Néanmoins, il est important de tester les prédictions faites par ces modèles en les comparant avec des données expérimentales non utilisées lors de l'apprentissage (données de test). Cette procédure permet de connaître leur capacité non à reproduire les résultats mais à les généraliser.

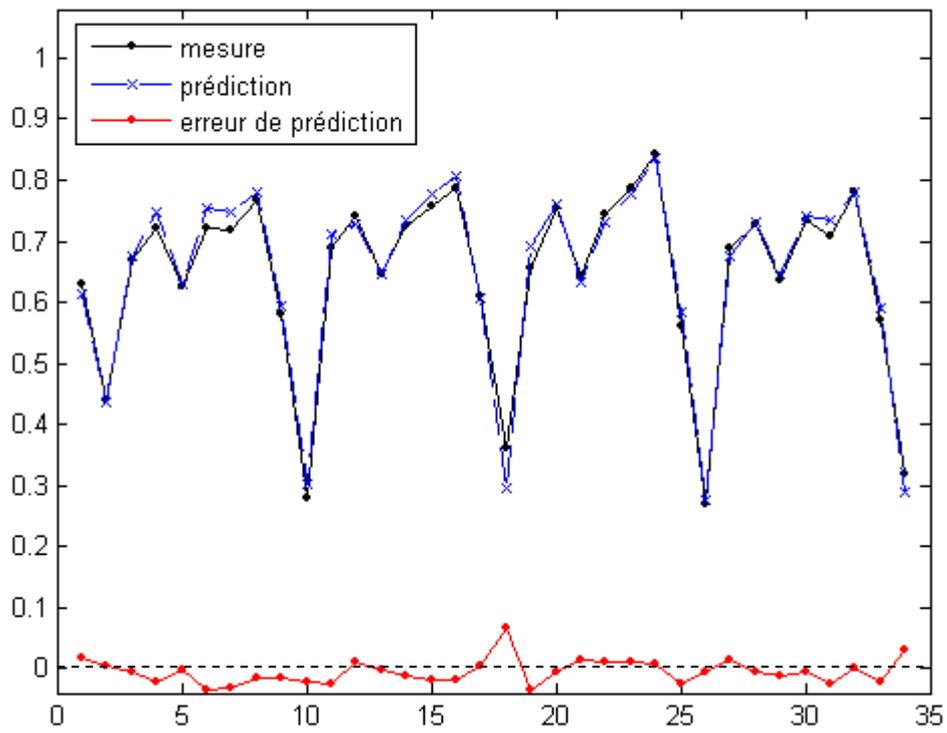
5.3.3.2 Généralisation

L'étude de la capacité de généralisation des modèles a été réalisée de façon similaire à celle de l'apprentissage, à l'aide de quatre critères de performance retenus (RMSE, MAE, MRAE, R). Le Tableau 5-7 illustre les résultats obtenus.

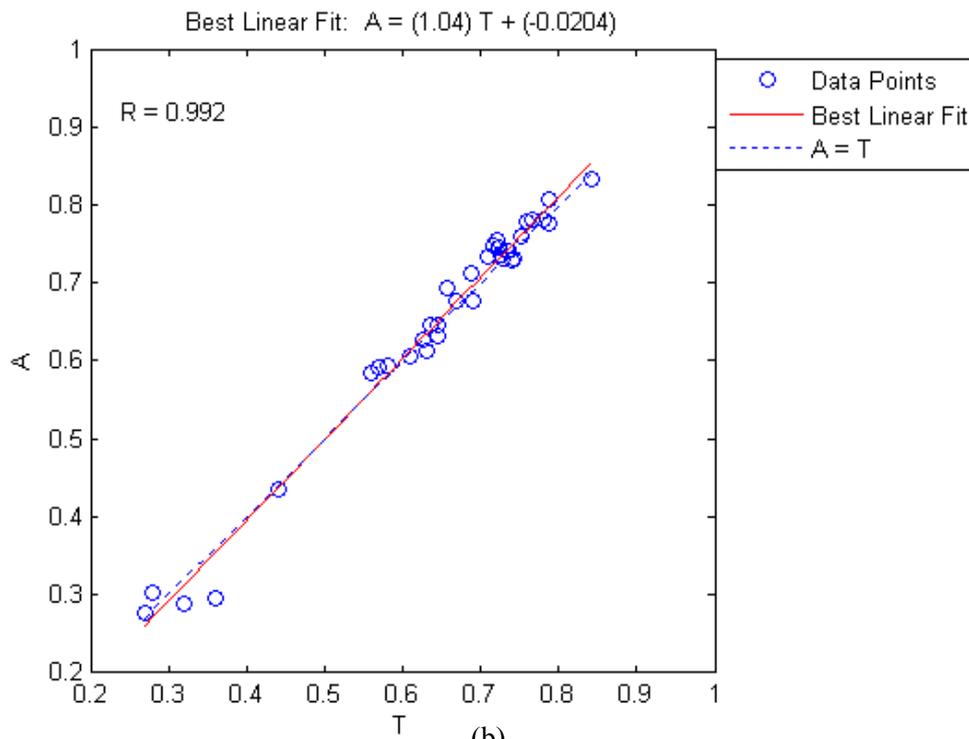
Sortie Critère	Modèle LM		Modèle BR	
	Cosinus de l'angle de contact	Hauteur capillaire	Cosinus de l'angle de contact	Hauteur capillaire
RMSE	0,0208	1,2164 mm	0,0137	1,0151 mm
MAE	0,0164	0,9673 mm	0,0112	0,7798 mm
MRAE	2,98 %	5,08 %	1,98 %	4,02 %
R	0,9920	0,9952	0,9957	0,9964

Tableau 5- 7 : Performances de deux modèles sur les données de test

Les Figures 5-12 et 5-13 présentent les valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact, ainsi que l'erreur de prédiction et le diagramme de parité correspondant, sur l'ensemble de test respectivement pour le modèle LM et le modèle BR. Les mêmes types de résultats sont présentés sur les Figure 5-14 et 5-15 pour la hauteur capillaire.



(a)



(b)

Figure 5- 12 : (a) Valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact et erreur de prédiction sur l'ensemble de test pour le modèle LM ; (b) Diagramme de parité correspondant

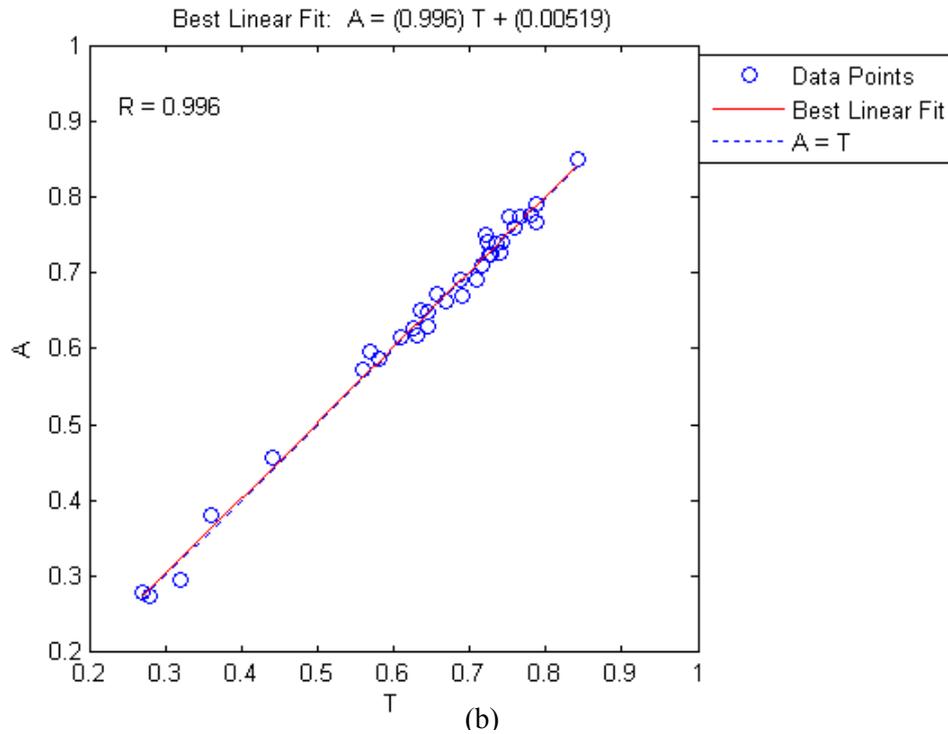
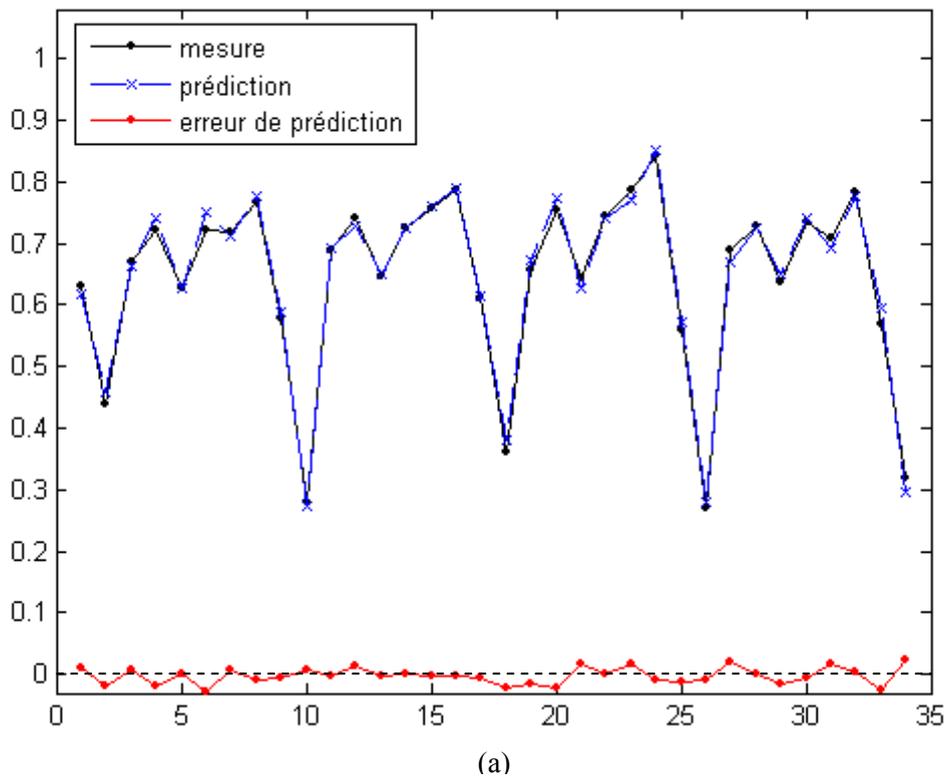


Figure 5- 13 : (a) Valeurs mesurées et prédites du cosinus de l'angle de contact et erreur de prédiction sur l'ensemble test pour le modèle BR ; (b) Diagramme de parité correspondant

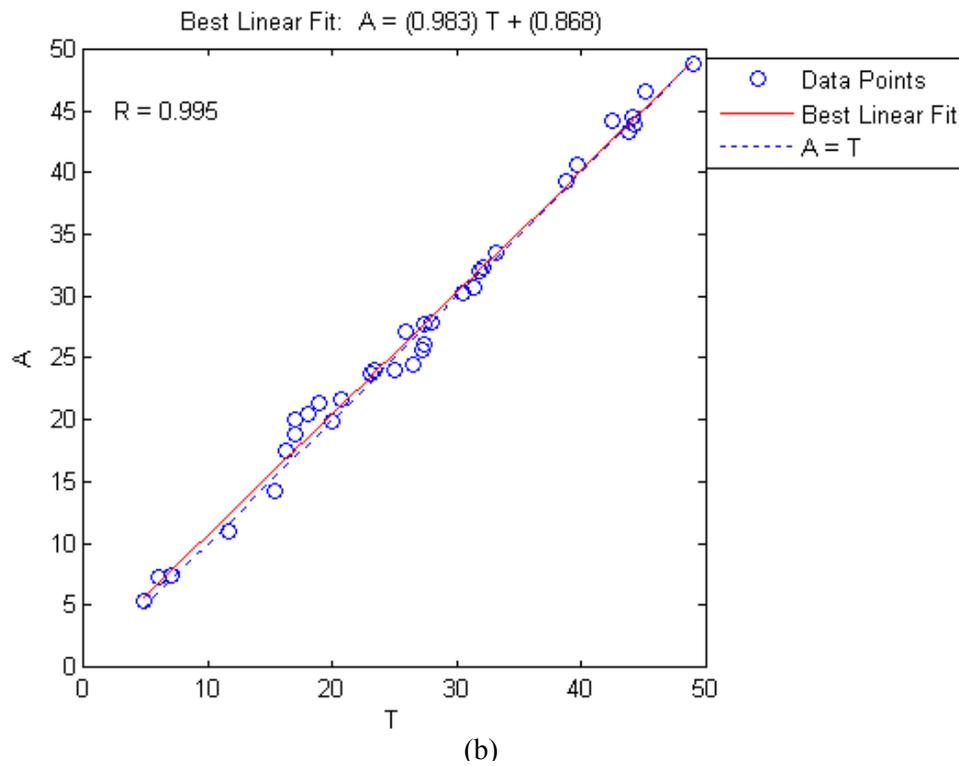
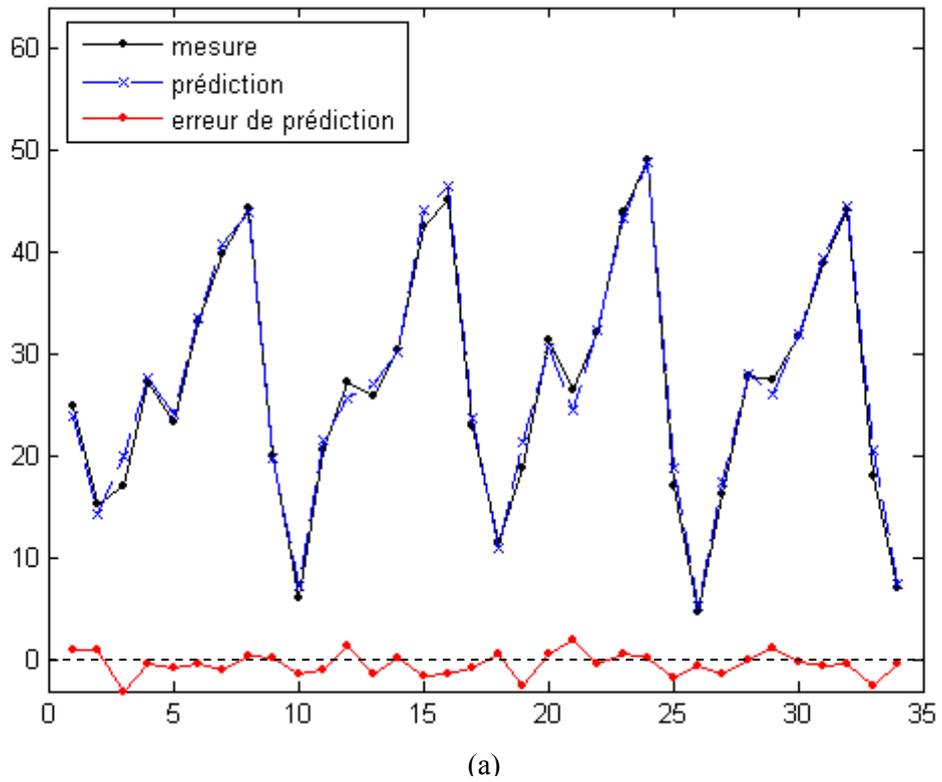


Figure 5- 14 : (a) Valeurs mesurées et prédites de la hauteur capillaire et erreur de prédiction sur l'ensemble de test pour le modèle LM ; (b) Diagramme de parité correspondant

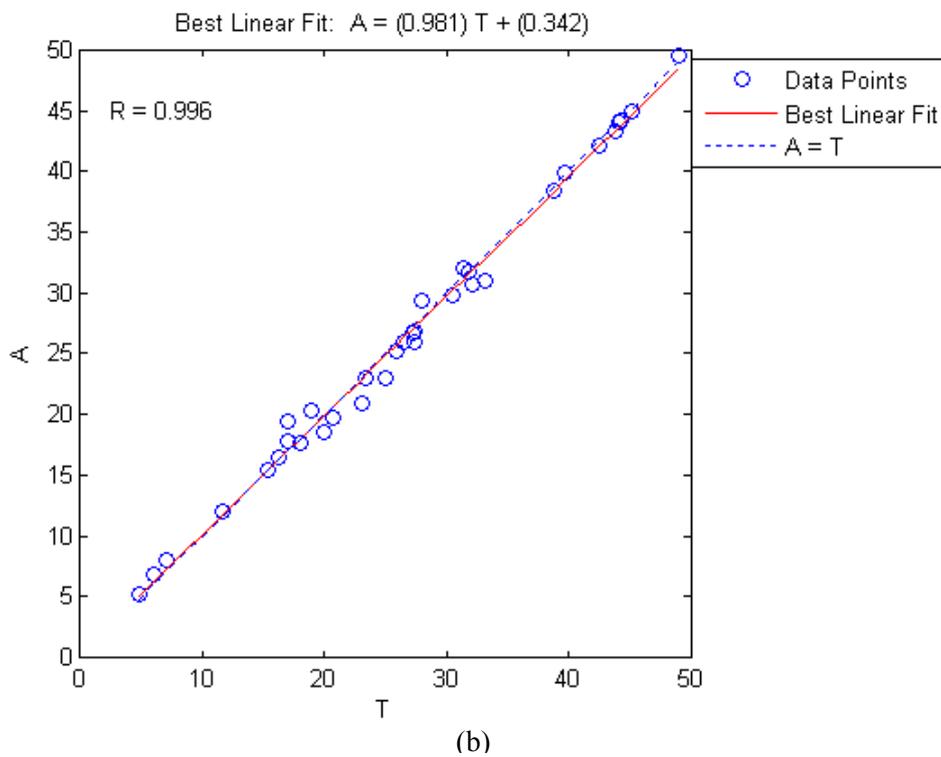
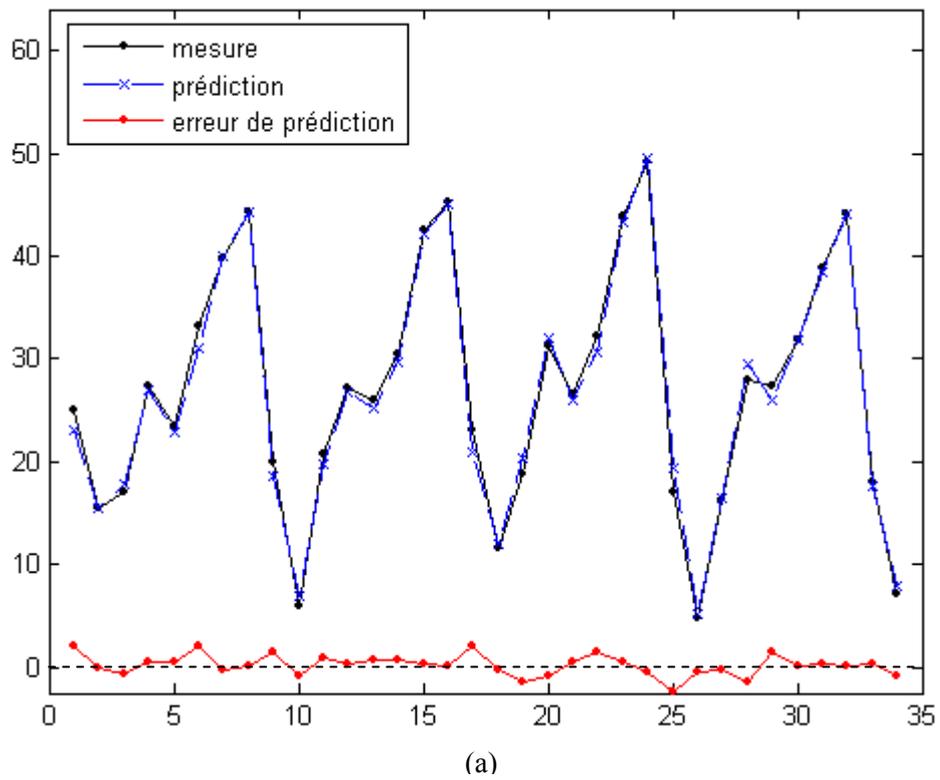


Figure 5- 15 : (a) Valeurs mesurées et prédites de la hauteur capillaire et erreur de prédiction sur l'ensemble de test pour le modèle BR ; (b) Diagramme de parité correspondant

D'après le Tableau 5-7, nous pouvons remarquer pour chaque modèle que les erreurs sur les données de test du cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire sont légèrement supérieures à celles commises au cours de l'apprentissage. De même, nous pouvons constater que les coefficients de corrélation sont aussi très légèrement moins importants pour les deux sorties.

En comparant les deux modèles, nous pouvons remarquer que l'erreur de prédiction du cosinus de l'angle de contact est moins importante dans le cas du modèle BR (Figure 5-13). En fait, pour ce modèle, la corrélation entre les valeurs mesurées et prédites est assez bonne ($R=0,996$) avec une erreur absolue moyenne (MAE) de 0,0112 et une erreur relative absolue moyenne (RMAE) de 1,98 %. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) correspondante est de 0,0137 (Tableau 5-7). De même, le diagramme de parité correspondant montre une bonne qualité des ajustements ce qui permet de conclure à des prédictions correctes du cosinus de l'angle de contact puisque les écarts observés sont faibles. Cependant, pour le modèle LM, la corrélation est de 0,992 avec une erreur absolue moyenne de 0,0164 et une erreur relative absolue moyenne de 2,98 % (Figure 5-12). La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne correspondante est de 0,0208. Ceci permet de conclure que le modèle LM prédit le cosinus de l'angle de contact avec une précision un peu moins importante mais acceptable. Les mêmes observations peuvent être notées pour la hauteur capillaire. En effet, les erreurs absolue et relative moyennes sont respectivement de 0,7798 mm et 4,02 % pour le modèle BR (Figure 5-15) et de 0,9673 mm et 5,08 % pour le modèle LM (Figure 5-14). La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne est de 1,0151 mm dans le premier cas et de 1,2164 dans le deuxième cas (Tableau 5-7). Cependant, les coefficients de corrélation présentent une même valeur de 0,996. La comparaison entre les données expérimentales (données de test) et les données prédites par ces modèles permet de conclure que les prédictions sont relativement proches de la réalité. Ces résultats prouvent que les capacités de généralisation de deux modèles LM et BR sont satisfaisantes ce qui confirme leur efficacité. Néanmoins, le modèle BR présente des meilleures performances en généralisation. Il apparaît donc comme le plus performant.

Ainsi, nous pouvons conclure que l'utilisation de la méthode de régularisation Bayésienne est préférable à la méthode d'arrêt prématuré puisqu'elle permet d'obtenir des résultats optimaux tout en nécessitant un nombre inférieur de neurones cachés. Un autre

avantage de cette méthode est qu'elle est plus simple à mettre en œuvre vu qu'elle ne nécessite pas l'utilisation d'un ensemble de validation au cours de l'apprentissage.

5.4 Analyse de l'importance des paramètres d'entrée

5.4.1 Généralités

La complexité de la fonction implémentée par le réseau de neurones rend l'analyse de la contribution de chaque paramètre extrêmement difficile. En effet, à partir des paramètres d'entrée, le réseau est capable de prédire le paramètre de sortie, mais les mécanismes intérieurs de réseau sont complètement ignorés [FAUR-BRASQUET, 2003]. Ainsi, l'interprétation de réseaux de neurones n'est pas aussi directe que pour celles des modèles simples de régression linéaire. Pour pallier à cet inconvénient, diverses méthodes ont été mises en œuvre pour caractériser la boîte noire de type réseau de neurones [DIMOPOULOS, 1999], [GEVREY, 2003], [PEDECKER, 2005], [TZENG, 2005], [GERVEY, 2006], [JOY, 2006].

Olden et al. [OLDEN, 2004] ont effectué une comparaison entre les différentes méthodes utilisées pour évaluer la contribution des variables en réseaux de neurones. Ils précisent que l'approche des poids des connexions est la plus souvent privilégiée par rapport aux autres approches en terme de précision et de fiabilité. Nous avons donc choisi d'utiliser cette approche afin d'examiner la contribution des paramètres prédictifs sur les sorties du procédé plasma.

5.4.2 Approche des poids des connexions

Rappelons que dans un réseau de neurones, les neurones sont reliés entre eux par des connexions pondérées. Ce sont les poids de ces connexions qui gouvernent le fonctionnement du réseau et programment une application de l'espace des entrées vers l'espace des sorties, à l'aide de la transformation non linéaire [PARIZAU, 2004]. Par conséquent, les poids des connexions représentent le lien entre le problème traité et sa solution.

L'approche des poids des connexions (Connexion Weight Approach) utilise les poids des connexions bruts des entrée-cachée et cachée-sortie d'un réseau de neurones. En fait, elle calcule le résultat des connexions brutes de neurones entrée-cachée et cachée-

sortie pour chaque entrée et neurone de sortie, et récapitule la somme des résultats à travers tous les neurones cachés [OLDEN, 2002]. Selon Olden et al. [OLDEN, 2004], cette approche fournit la meilleure méthodologie pour une identification plus précise de l'importance des paramètres du modèle. Elle permet donc d'identifier avec succès l'importance réelle de toutes les variables du réseau de neurones.

La contribution relative des paramètres indépendants sur la prédiction émise par le réseau dépend donc de la valeur et de la direction des poids des connexions obtenues pour chacun des paramètres considérés. Un paramètre d'entrée avec des poids des connexions forts représente une grande intensité sur le transfert de signal. Autrement dit, il a une contribution forte sur la prédiction du réseau par rapport aux autres paramètres caractérisés par des poids des connexions plus petits. De même, des poids des connexions négatifs indiquent une influence négative du paramètre d'entrée sur la sortie. Cependant, des poids des connexions positifs indiquent une influence positive du paramètre d'entrée sur la sortie [OLDEN, 2002], [OLDEN, 2008].

5.4.3 Mise en œuvre

Considérons, dans un premier temps, le modèle LM. Ce modèle de réseau est constitué de 7 neurones d'entrée, 9 neurones cachés et deux neurones de sortie, dont les matrices des poids des connexions sont données dans les Tableaux 5-8 et 5-9.

Entrée	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉
Puissance électrique	0,6784	0,3528	0,4104	0,0225	-0,0293	0,6311	1,9522	-1,4430	0,1062
Vitesse de traitement	-1,4391	-0,7624	-0,0701	0,0734	-0,4638	-0,4609	0,0786	0,2926	-0,3845
Matière	0,3418	-0,7996	0,7220	-1,6129	-1,2481	-0,0149	0,0193	-0,1927	-0,1837
Perméabilité à l'air	-1,3984	-0,8033	1,0911	0,2023	-0,2430	0,5186	0,2552	0,1704	-0,0764
Finesse des fibres	-0,0755	0,0756	0,6102	1,1134	0,2166	0,6575	0,0508	-0,0850	-0,5423
Armure	0,1922	-0,6990	-0,0072	-0,0700	1,2382	-0,0361	-0,0186	0,0129	0,1412
Densité des pics	0,1070	0,9691	0,7106	0,2410	-0,1162	-0,0577	-0,0664	-0,0083	0,8707

Tableau 5- 8 : Matrice des poids des connexions entrées - neurones cachés de modèle LM

Sortie	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉
Cosinus de l'angle de contact	0,8231	0,0730	0,1560	-0,5566	0,0134	-0,0023	1,7118	-0,8063	0,5113
Hauteur capillaire	0,5230	-0,1675	-0,2896	-1,0653	0,2334	0,4441	0,6523	-1,2371	0,2947

Tableau 5- 9 : Matrice des poids des connexions neurones cachés – sortie de modèle LM

La procédure de calcul consiste à multiplier les valeurs des poids des connexions de la couche entrée-cachée, pour chaque neurone caché (N_i) et chaque neurone de sortie, par la valeur du poids de connexion de la couche cachée-sortie. En effectuant cette démarche pour chaque neurone d'entrée, nous identifions sa contribution à chaque sortie. Le produit effectué donne les résultats présentés dans les Tableaux 5-10 et 5-11 respectivement pour le cosinus de l'angle de contact (sortie 1) et la hauteur capillaire (sortie 2).

Entrée	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉
Puissance électrique	0,5585	0,0258	0,0640	-0,0125	-0,0004	-0,0015	3,3418	1,1635	0,0543
Vitesse de traitement	-1,1846	-0,0557	-0,0109	-0,0408	-0,0062	0,0011	0,1346	-0,2359	-0,1966
Matière	0,2813	-0,0584	0,1126	0,8977	-0,0168	0,0000	0,0330	0,1553	-0,0939
Perméabilité à l'air	-1,1511	-0,0587	0,1702	-0,1126	-0,0033	-0,0012	0,4368	-0,1374	-0,0391
Finesse des fibres	-0,0621	0,0055	0,0952	-0,6197	0,0029	-0,0015	0,0869	0,0869	-0,2773
Armure	0,1582	-0,0510	-0,0011	0,0390	0,0166	0,0001	-0,0319	-0,0104	0,0722
Densité des pics	0,0881	0,0708	0,1109	-0,1341	-0,0016	0,0001	-0,1137	0,0067	0,4452

Tableau 5- 10 : Matrice résultante des produits des poids des connexions pour le cosinus de l'angle de contact

Entrée	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉
Puissance électrique	0,3548	-0,0591	-0,1188	-0,0240	-0,0068	0,2803	1,2734	1,7852	0,0313
Vitesse de traitement	-0,7526	0,1277	0,0203	-0,0782	-0,1083	-0,2047	0,0513	-0,3619	-0,1133
Matière	0,1788	0,1339	-0,2091	1,7182	-0,2913	-0,0066	0,0126	0,2383	-0,0541
Perméabilité à l'air	-0,7313	0,1345	-0,3160	-0,2155	-0,0567	0,2303	0,1664	-0,2108	-0,0225
Finesse des fibres	-0,0395	-0,0127	-0,1767	-1,1861	0,0505	0,2920	0,0331	0,1052	-0,1598
Armure	0,1005	0,1171	0,0021	0,0746	0,2890	-0,0161	-0,0121	-0,0159	0,0416
Densité des pics	0,0560	-0,1623	-0,2058	-0,2567	-0,0271	-0,0256	-0,0433	0,0103	0,2566

Tableau 5- 11 : Matrice résultante des produits des poids des connexions pour la hauteur capillaire

Ensuite, on effectue la somme des produits précédents pour chaque neurone d'entrée suivant l'Equation 5-13 :

$$Entrée_i = \sum_{N=1}^9 Caché_{iN} \quad (5-13)$$

On peut alors quantifier l'importance ou la distribution de tous les poids de sortie attribués aux paramètres d'entrée donnés. Les résultats obtenus, pour chaque paramètre d'entrée étudié sont présentés dans le Tableau 5-12.

Entrée	Sortie			
	Cosinus de l'angle de contact		Hauteur capillaire	
	Valeur obtenue	Rang des entrées par ordre d'importance relative	Valeur obtenue	Rang des entrées par ordre d'importance relative
Puissance électrique	5,1935	1	3,5162	1
Vitesse de traitement	-1,5951	2	-1,4197	3
Matière	1,3110	3	1,7206	2
Perméabilité à l'air	-0,8962	4	-1,0215	5
Finesse des fibres	-0,7016	5	-1,0939	4
Armure	0,1916	7	0,5807	6
Densité des pics	0,4724	6	-0,3980	7

Tableau 5- 12 : Résultats de l'approche des poids des connexions pour le modèle LM

Nous pouvons remarquer dans ces deux cas que les valeurs obtenues sont positives pour la puissance électrique, la matière et l'armure et négatives pour la vitesse de traitement, la perméabilité à l'air et la finesse des fibres. Par contre, la valeur obtenue pour la densité des pics est positive dans le premier cas et négative dans le deuxième cas.

Selon l'approche des poids des connexions, un paramètre d'entrée avec des poids des connexions positifs indique une influence positive sur la sortie ce qui signifie que l'augmentation de ce dernier entraîne une augmentation de la sortie. Au contraire, si les poids des connexions sont négatifs, ceci indique que l'augmentation de paramètre d'entrée correspondant entraîne une diminution de la sortie.

Ainsi, dans notre cas, les résultats indiquent que l'augmentation de la puissance électrique entraîne une augmentation de cosinus de l'angle de contact et de la hauteur capillaire. Cependant, l'augmentation de la vitesse de traitement, de la perméabilité à l'air et de la finesse des fibres entraîne une diminution de ces deux sorties. En ce qui concerne la matière et l'armure, rappelons que le codage binaire utilisé est de « 0 » pour le polyester et l'armure toile et de « 1 » pour la viscose et l'armure sergé. Ceci indique que le traitement plasma des tissus en viscose résulte en une meilleure mouillabilité et capillarité. Même constat concernant les tissus en armure de sergé. Ces résultats sont en concordance avec ceux présentés dans le Chapitre 4 (*Chap 4 - § 4.3*). En fait, nous avons observé que

plus la puissance électrique est importante et la vitesse de traitement est faible plus l'oxydation de textile est importante. De même, nous avons constaté que la mouillabilité et la capillarité sont meilleures pour les tissus en fibres de viscose. Nous avons également noté que le traitement des fibres plus fines en polyester est plus efficace. En outre, nous avons remarqué après traitement plasma que plus la perméabilité de l'air est moins élevée, plus la mouillabilité est importante. Ceci peut s'expliquer par le fait que plus le tissu est dense (moins perméable à l'air) plus la surface offerte au traitement plasma sera importante et ainsi le traitement sera plus efficace. Par ailleurs, nous avons observé que les tissus en armure de sergé donnent une capillarité légèrement plus importante que celle des tissus en armure toile et constitués de fibres de même type. De plus, nous avons noté pour les tissus de même type que plus la densité des pics est importante, plus la mouillabilité est meilleure après traitement. Cependant, les résultats révèlent ici que l'augmentation de la densité des pics a un effet inhibiteur sur la capillarité. Pour expliquer cet effet, nous avons suivi les variations de la hauteur capillaire en fonction de la densité des pics (Figure 5-16).

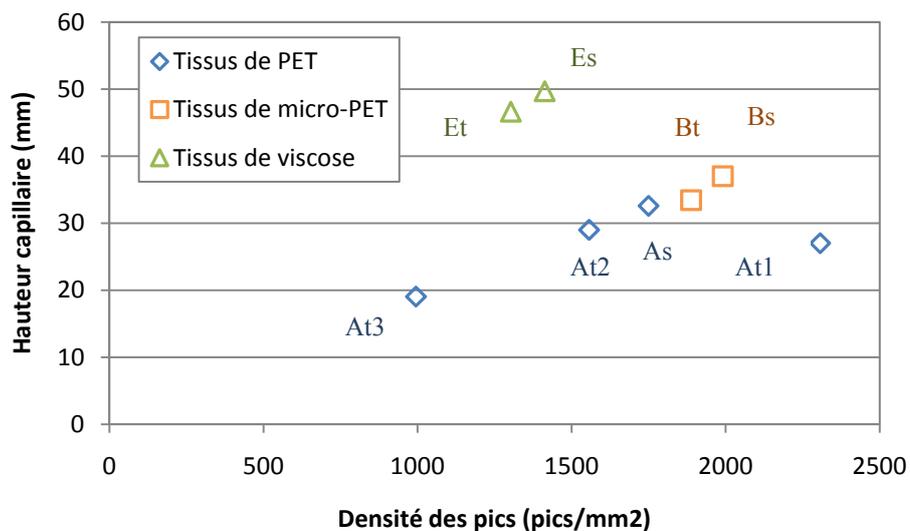


Figure 5- 16 : Variations de la hauteur capillaire en fonction de la densité des pics des différents tissus (TP = 60 kJ/m²)

Nous pouvons remarquer que la tendance générale dans les variations de la hauteur capillaire en fonction de la densité des pics est un peu différente de ce qui a été observé pour le cosinus de l'angle de contact (*Chap 4 – Figure 4-14*). En fait, si on considère le même type de tissu, nous remarquons après traitement que le tissu polyester At1 présente une densité des pics plus importante que les tissus At2 et As, mais sa capillarité est un peu moins importante que celle de ces deux tissus. De même, nous pouvons constater que le

tissu As et Bt ont des densités des pics un peu différentes mais leurs hauteurs capillaires sont très proches. Nous pouvons donc conclure que c'est la tendance à la réponse négative qui domine.

Les paramètres d'entrée sont classés par ordre d'importance relative selon les valeurs absolues de leurs poids des connexions. En fait, plus la valeur absolue des poids des connexions est importante, plus le paramètre d'entrée correspondant a une contribution forte sur la prédiction du réseau [DAS, 2006], [DAS, 2008]. Les résultats mettent en évidence la forte influence de la puissance électrique sur le cosinus de l'angle de contact et la hauteur capillaire. Ensuite, viennent la vitesse de traitement et la matière. Après, la finesse des fibres et la perméabilité à l'air. En dernière position, interviennent l'armure et de la densité des pics. Ainsi, pour le cosinus de l'angle de contact, l'ordre obtenu est le suivant: puissance électrique > vitesse de traitement > matière > perméabilité à l'air > finesse des fibres > densité des pics > armure. Concernant la hauteur capillaire, l'ordre obtenu est le suivant: puissance électrique > matière > vitesse de traitement > finesse des fibres > perméabilité à l'air > armure > densité des pics. Ces résultats sont presque identiques à ceux obtenus en utilisant le critère de sensibilité flou (*Chap 4 – Tableaux 4-17 et 4-18*). En fait, les paramètres d'entrée ont été identifiés par la procédure de sélection dans presque le même ordre de pertinence et ceci pour chaque sortie. La seule différence qui se présente cette fois-ci est que pour la hauteur capillaire, la perméabilité à l'air a été identifié comme plus significative que la finesse des fibres, mais ici les résultats montrent que la finesse des fibres est très légèrement plus importante que la perméabilité à l'air.

Pour vérifier ces résultats nous allons appliquer, dans un deuxième temps, l'approche des poids des connexions au deuxième modèle BR. Ce modèle réseau est constitué de 7 neurones d'entrée, 7 neurones cachés et deux neurones de sortie, dont les matrices des poids des connexions sont données dans les Tableaux 5-13 et 5-14.

Entrée	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇
Puissance électrique	0,1388	0,0605	0,5082	-0,4049	-0,3815	0,1518	-0,0792
Vitesse de traitement	0,0889	-0,4965	-0,1018	0,3346	0,1217	0,0356	-0,2028
Matière	0,4650	0,4890	0,3037	0,1113	0,0571	-0,0363	-0,0748
Perméabilité à l'air	0,6645	-0,6322	1,6104	-0,5036	0,8655	0,0514	-0,4383
Finesse des fibres	0,5519	-0,7947	0,3889	0,6014	-0,9227	0,0359	-0,1041
Armure	-1,6919	0,1243	-0,0715	-0,0511	-0,0654	0,0053	0,0217
Densité des pics	-0,0209	-0,8026	-0,2344	-0,5772	-0,3866	0,1457	0,2508

Tableau 5- 13 : Matrice des poids des connexions entrées - neurones cachés de modèle BR

Sortie	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇
Cosinus de l'angle de contact	-0,0787	-1,6835	-0,9312	0,6754	0,7830	-2,3480	0,6798
Hauteur capillaire	1,2190	-0,3419	-0,6748	0,4088	0,2099	-1,4058	0,3274

Tableau 5- 14 : Matrice des poids des connexions neurones cachés – sortie de modèle BR

En suivant la même procédure de calcul décrite précédemment, les résultats obtenus, pour chaque paramètre d'entrée et chaque sortie sont présentés dans le Tableau 5-15.

Entrée	sortie			
	Cosinus de l'angle de contact		Hauteur capillaire	
	Valeur obtenue	Rang des entrées par ordre d'importance relative	Valeur obtenue	Rang des entrées par ordre d'importance relative
Puissance électrique	4,2457	1	2,5842	1
Vitesse de traitement	-1,5110	2	-0,9492	3
Matière	1,2493	3	1,2131	2
Perméabilité à l'air	-0,7767	4	-0,8798	4
Finesse des fibres	-0,4752	5	-0,4197	5
Armure	0,1114	7	0,2662	6
Densité des pics	0,1593	6	-0,1262	7

Tableau 5- 15 : Résultats de l'approche des poids des connexions pour le modèle BR

Nous pouvons remarquer que les valeurs obtenues par l'approche des poids des connexions, pour les différents paramètres d'entrée, sont moins importantes que celles obtenues dans le cas précédent (Tableau 5-12). Ceci peut être attribué au nombre des poids des connexions qui est moins important dans ce cas. En fait, le modèle BR comporte un nombre inférieur de neurones cachés ce qui permet de réduire le nombre des poids des connexions par comparaison au modèle LM. Cependant, les mêmes observations peuvent être notées concernant les deux sorties considérées. Nous pouvons remarquer que les signes des valeurs obtenues par l'approche des poids des connexions pour les différents paramètres d'entrée sont les mêmes que celles obtenues précédemment. De même, nous pouvons constater que la puissance électrique occupe toujours le premier rang avec une valeur des poids des connexions plus importante. Ceci indique une importance forte de ce paramètre dans la valeur estimée de la sortie du modèle. Même constat est observé pour les autres paramètres. De plus, nous pouvons noter que le classement par ordre d'importance relative est quasiment identique à celui obtenu en utilisant le critère de sensibilité flou (*Chap 4 – Tableaux 4-17 et 4-18*). Ces résultats confirment donc l'influence des paramètres sélectionnés sur les résultats du traitement par plasma. Ainsi, l'utilisation de l'approche des poids des connexions a montré qu'il est possible d'extraire de l'information à partir des modèles de réseaux de neurones. Nous pouvons donc conclure que les réseaux de neurones ne sont pas nécessairement des « boîtes noires » puisqu'ils sont capables de fournir des règles exploitables.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la technique des réseaux de neurones a été choisie comme un modèle statistique du fait de sa parcimonie et de sa rapidité. Les réseaux mis en œuvre incluent une seule couche cachée avec des fonctions d'activation sigmoïdes tangentielles. L'algorithme d'apprentissage de Levenberg-Marquardt a été utilisé pour optimiser les poids des réseaux, en raison de sa rapidité et fiabilité. La technique d'arrêt prématuré et la technique de régularisation Bayésienne ont été utilisées pour limiter les phénomènes de sur-apprentissage. Deux algorithmes ont été présentés pour déterminer le nombre optimal de neurones cachés et d'itérations. Ces algorithmes utilisent la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne et le coefficient de corrélation comme deux critères pour décider des performances globales du réseau.

L'approche neuronale développée a été appliquée au procédé plasma afin de prédire la relation entre les paramètres pertinents sélectionnés des matériaux étudiés et du processus de traitement plasma (entrées) et les propriétés spécifiques recherchées (sorties). L'architecture du modèle obtenu en utilisant la technique d'arrêt prématuré (modèle LM) a été optimisée avec 9 neurones cachés et 110 itérations. Cependant, la structure du modèle obtenu en utilisant la technique de régularisation Bayésienne (modèle BR) a été optimisée avec 7 neurones cachés et 250 itérations. La qualité de ces modèles neuronaux a été jugée selon deux critères : leurs capacités d'apprentissage et leurs pouvoirs de généralisation. Les résultats obtenus sur les deux sorties par ces modèles présentent une qualité satisfaisante tant vis-à-vis de l'erreur de prédiction que vis-à-vis de l'erreur relative. Ces résultats mettent en valeur la concordance acceptable entre les valeurs mesurées et prédites, et de ce fait, ils montrent une bonne fiabilité de prédiction de deux modèles. Cependant, le modèle BR s'avère être le modèle le plus performant et le mieux adapté puisqu'il présente des meilleures performances en généralisation. De ce fait, nous pouvons conclure que l'utilisation de la technique de régularisation Bayésienne semble préférable à la méthode d'arrêt prématuré puisqu'elle permet d'obtenir des résultats optimaux.

Une analyse quantitative par poids des connexions a permis d'analyser la contribution de paramètres d'entrée sur la prédiction des réseaux de neurones et d'évaluer l'importance relative de ces paramètres comparés les uns aux autres. Cette analyse a bien confirmé les résultats présentés dans le Chapitre 4. Ainsi, l'approche utilisant les réseaux de neurones a permis d'atteindre deux objectifs : modéliser les données expérimentales à l'aide d'une relation non linéaire, et évaluer l'importance relative des différents paramètres explicatifs. Les résultats obtenus sont satisfaisants et montrent une très bonne fiabilité de prédiction des réseaux de neurones. De plus, ces résultats reflètent la capacité descriptive des ces réseaux. Ceci permet d'échapper à une des critiques souvent formulées à l'égard des réseaux de neurones concernant leur incapacité à expliquer la façon dont ils procèdent pour parvenir au résultat final. Nous pouvons donc conclure que les réseaux de neurones sont capables d'apporter une solution performante au problème posé.

Conclusion Générale et perspectives

Conclusion

L'étude menée durant cette thèse a été faite à l'échelle laboratoire. Elle s'est focalisée sur l'étude de l'amélioration des propriétés de mouillage et de capillarité des textiles synthétiques et artificiels car c'est un problème récurrent pour les industriels du textile.

Une large revue bibliographique a été réalisée sur les modifications de surface par traitement plasma de différentes structures textiles. Cette étude nous a permis de comprendre les phénomènes d'oxydation, de vieillissement et de la modification de la topographie de surface mis en jeu. Les résultats publiés montrent le potentiel de l'utilisation de la technique plasma pour la modification de surface. Cependant, ils révèlent une complexité du traitement plasma qui est due essentiellement au nombre important de facteurs influençant le traitement (nature de gaz plasmagène, densité de gaz, puissance électrique, vitesse de traitement, nature chimique et propriétés physico-chimiques du polymère, humidité, structure de substrat à traiter...) ainsi qu'au nombre considérable de machines existantes permettant le traitement plasma et donnant autant des résultats différents.

Dans ce cadre, le plasma atmosphérique présente un grand intérêt pour l'industrie car, en plus des avantages des plasmas basse pression, il ne nécessite pas l'utilisation de chambre à vide très coûteuse et peu pratique dans le monde industriel. Cependant, l'adaptation de cette technologie requiert une meilleure compréhension des mécanismes qu'elle implique.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail était d'une part, de progresser dans la compréhension de l'influence des paramètres opératoires de processus sur les modifications apportées par plasma et d'autre part, sur ces bases, d'optimiser le procédé de modification de surface par plasma.

Comme nous avons expliqué en introduisant ce manuscrit, cette thèse se place dans la continuité de la première étude réalisée par Frédéric Leroux au laboratoire GEMTEX. Ses travaux ont mis en avant le potentiel de la décharge contrôlée par barrière diélectrique (DBD) à pression atmosphérique pour la modification de surface des matériaux textiles. L'enjeu était donc de proposer un travail original par rapport à ces premiers résultats, tout en poursuivant les pistes mises en évidence.

Ce travail est divisé en deux parties principales. Dans la première partie, nous sommes concentrés sur les modifications de surface par traitement plasma de différentes structures textiles. En fait, nous avons utilisé différents tissus présentant des caractéristiques différentes principalement au niveau de la matière, de la finesse des fibres, de la construction de l'armure et de la porosité. Ces tissus ont été traités dans les mêmes conditions par un plasma de type décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique utilisant l'air ambiant comme gaz plasmagène. Les résultats obtenus ont mis évidence une amélioration considérable de la mouillabilité et de la capillarité des ces tissus vis-à-vis de l'eau distillée, après le traitement plasma. Cette augmentation de l'énergie de surface peut être attribuée à la création de groupements polaires en surface. Ainsi, les traitements plasma, en augmentant l'affinité des fibres aux liquides, vont permettre de favoriser les traitements postérieurs tels que la teinture, l'impression, l'adhésion, etc. Ceci confirme donc que notre machine plasma constitue une technologie prometteuse pour la modification de surface des matériaux textiles.

Dans un souci de mieux comprendre l'influence de la structure textile sur les résultats de traitement, nous avons choisi d'utiliser une méthode de sélection des variables basée sur la logique floue, en raison de sa robustesse et adaptabilité aux imprécisions et manque de données. De même, nous avons élaboré un algorithme pour sélectionner les paramètres les plus pertinents et éliminer les paramètres les moins pertinents ainsi que ceux qui présentent des corrélations avec les paramètres pertinents. En utilisant ces critères, nous avons mené

deux études « locale » et « globale » afin de déterminer les paramètres d'entrée les plus influents. La combinaison des résultats issus de ces deux études de sélection a mis en évidence l'influence de sept paramètres qui sont la puissance électrique, la vitesse de traitement, la matière, la finesse des fibres, la perméabilité à l'air, l'armure et la densité des pics.

En analysant les effets des paramètres sélectionnés, nous avons constaté que l'augmentation de la puissance électrique et/ou la diminution de la vitesse de traitement entraîne une oxydation de surface plus importante. De même, nous avons remarqué que la nature chimique du substrat joue sur la mouillabilité et la capillarité maximales pouvant être atteintes après traitement par plasma. Nous avons également constaté que le traitement des fibres plus fines est plus efficace. En outre, nous avons noté que la perméabilité à l'air a un impact sur la puissance de traitement nécessaire pour l'oxydation de surface et sur la possibilité offerte au plasma de traiter les fibres présentes à l'intérieur de la structure textile. Il est donc important d'adapter la puissance de traitement à la structure textile pour que le traitement soit optimal. Par ailleurs, nous avons observé que les tissus en armure de sergé et de même type donnent une capillarité légèrement meilleure que celle des tissus en armure toile. De ce fait, nous avons supposé que le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame a un impact sur l'interaction plasma-surface textile. De plus, nous avons remarqué pour les tissus de même type que plus la densité des pics est importante, plus la mouillabilité est meilleure après traitement. Nous avons attribué ce résultat au fait que lorsque le nombre d'aspérités est élevé, les sites polaires introduites à la surface par le traitement plasma vont s'accrocher sur ces points ce qui entraîne une meilleure oxydation en surface.

Dans ce cadre, il est important de noter que la thèse antérieure à notre étude, qui en se basant essentiellement sur des travaux expérimentaux, a souligné que la puissance de traitement, la porosité et la perméabilité à l'air influent de manière importante sur les résultats de traitement. De même, d'autres auteurs ont souligné que la puissance électrique, la vitesse de traitement, la matière et la finesse des fibres ont une influence sur les traitements plasma.

En résumant ainsi, cette étude a permis de mettre en évidence l'impact de la structure textile sur le traitement plasma. De même, elle a permis de cerner l'influence des paramètres sélectionnés ce qui va permettre une meilleure compréhension des interactions plasma-surface. Ceci confirme donc l'efficacité de l'utilisation du critère de sensibilité flou. En fait, ce critère, en supprimant les entrées moins pertinentes, a permis de faciliter l'étude du procédé plasma.

Dans la seconde partie de ce travail de recherche, nous avons utilisé les réseaux de neurones afin de trouver des modèles capables de décrire la relation entre les paramètres sélectionnés et les sorties du procédé plasma. Les réseaux neuronaux mis en œuvre sont de type feed-forward et ils incluent une seule couche cachée. Ce choix découle de la propriété d'approximation universelle parcimonieuse des perceptrons multicouches. La fonction de transfert utilisée pour la couche cachée est la fonction tangente hyperbolique et celle pour la couche de sortie est linéaire. L'algorithme d'optimisation retenu est celui de Levenberg-Marquardt qui est caractérisé par sa rapidité et fiabilité. Deux approches ont été considérées pour limiter le phénomène de sur-apprentissage : une approche d'arrêt prématuré qui consiste à arrêter l'apprentissage prématurément c.-à-d. avant que l'algorithme s'ajuste trop finement aux données d'apprentissage et une approche de régularisation Bayésienne qui consiste à pénaliser la fonction du coût pour empêcher les poids de prendre des valeurs élevées. En outre, deux algorithmes itératifs complémentaires ont été développés afin de déterminer le nombre optimal de neurones cachés ainsi que le nombre d'itérations pour effectuer l'apprentissage. Ces algorithmes utilisent la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne et le coefficient de corrélation comme deux critères pour décider des performances globales des réseaux et ainsi de leur structure.

En appliquant cette méthodologie au procédé plasma, l'architecture du modèle utilisant la technique d'arrêt prématuré (modèle LM) a été optimisée avec 9 neurones cachés et 110 itérations. Tandis que, la structure du modèle utilisant la technique de régularisation Bayésienne (modèle BR) a été optimisée avec 7 neurones cachés et 250 itérations. Une comparaison a été établie entre ces deux modèles, en utilisant différents critères statistiques, afin d'évaluer leurs performances en terme d'apprentissage et de test. Les résultats obtenus ont montré que les modèles reproduisent bien la topologie des données d'apprentissage et qu'ils démontrent tous les deux des performances acceptables pour la prédiction. Cependant, le modèle BR s'avère être le modèle le plus performant puisqu'il donne un ajustement aux données meilleur que celui offert par le modèle LM. Ceci permet de conclure que l'utilisation de la méthode de régularisation Bayésienne semble préférable à la méthode de l'arrêt prématuré.

Une approche basée sur les poids des connexions a été appliquée aux deux modèles obtenus afin d'analyser l'importance relative des paramètres d'entrée et déterminer leur contribution sur la prédiction des sorties. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux obtenus en utilisant le critère de sensibilité flou. Ceci confirme donc l'influence des

paramètres sélectionnés d'une part, et reflète la possibilité d'interprétation des réseaux de neurones d'autre part.

En conclusion, l'approche globale de cette étude a permis de déterminer les paramètres les plus pertinents à ajuster en vue de les adapter à une échelle industrielle et de les optimiser pour obtenir la qualité et le type de l'effet désiré. En effet, seule la complémentarité entre expérience et modélisation confère un réel crédit à ce type d'approche. La procédure développée nous semble applicable à une vaste gamme d'applications de la décharge à barrière diélectrique atmosphérique, afin d'obtenir un contrôle précis des effets engendrés par les traitements. Dans la continuité de ce travail, il est possible d'envisager plusieurs perspectives puisque nous nous plaçons ici au cœur d'une thématique qui n'en est qu'à son début, même s'il faudra bien entendu prendre en compte l'existant qui concerne les décharges plasmas à basse pression.

Perspectives

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude témoignent de l'efficacité de notre système de traitement plasma qui semble être une technique moins coûteuse et bien adaptée pour l'oxydation de surface des matériaux textiles. Ceci démontre aussi que cette technique n'est pas limitée à des études en laboratoire mais qu'elle est exportable dans l'industrie textile. Cependant, une limite de cette technique est que l'utilisation de gaz plasmagène est moins contrôlée chimiquement du fait de caractère ouvert de l'enceinte de génération de plasma. Il serait donc difficile d'utiliser des gaz spéciaux dans ce type de machine pour des raisons environnementales. Ainsi, il revient à chaque industriel d'adapter son équipement de traitement suivant l'effet qu'il désire.

Du point de vue expérimental, il serait intéressant d'approfondir l'étude de l'effet de la structure textile sur les résultats de traitement par plasma, en rajoutant d'autres matières textiles, d'autres armures dérivées ainsi que d'autres types de structures textiles telles que les non-tissés, les tricots, etc. Il serait également intéressant d'effectuer une étude de vieillissement et de déterminer l'effet de la structure textile sur ce phénomène.

Dans ce contexte, il est nécessaire de disposer d'un maximum d'information pour pouvoir analyser correctement les mécanismes responsables de la qualité des effets obtenus. D'ailleurs, une compréhension claire du milieu plasma atmosphérique nécessite l'utilisation de méthodes expérimentales variées : le fait de n'utiliser que des analyses de surface post-traitement empêche d'avoir une vision complète des interactions plasma-surface lors de la modification de surface par plasma. Il serait donc primordial d'identifier et quantifier les espèces chimiques présentes à l'intérieur du plasma lors du traitement pour pouvoir ensuite corréler ces données avec la chimie de surface des polymères traités. De cette manière, il serait possible de connaître les acteurs moléculaires important à l'intérieur même du plasma qui sont responsable de la modification de surface observée. Par voie de conséquence, beaucoup de travail reste à faire pour mieux comprendre les phénomènes tant au niveau de la nature du plasma que des interactions avec les surfaces.

En ce qui concerne la sélection des paramètres pertinents, des améliorations sont à apporter à la méthode utilisée. En fait, dans notre cas, on ne dispose pas de la connaissance humaine sur le procédé de modification de surface par plasma. Cependant, il serait très

important d'intégrer une telle connaissance pour améliorer et affiner la sélection des paramètres pertinents.

Du point de vue modélisation, il est important de souligner que les performances des réseaux de neurones dépendent beaucoup de la quantité et de la qualité des données disponibles pour entraîner et valider le modèle. Si le nombre de données est insuffisant, la possibilité du modèle à prédire de nouvelles données serait compromise. De ce fait, les bases de données à utiliser doivent être suffisamment riches et représentatives. En outre, il serait intéressant d'entamer la modélisation en utilisant d'autres méthodes d'intelligence artificielle comme la logique floue, les systèmes neuro-flous, les algorithmes génétiques, les arbres de décision etc... et de comparer les performances de chaque méthode.

Finalement, nous espérons que les résultats obtenus lors de ce travail pourront contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes de modification des matériaux textiles par plasma atmosphérique. Nous espérons également que ce travail sera d'une aide appréciable à ceux qui veulent poursuivre et approfondir cette étude.

Bibliographie

[AFNOR, 1975]: Association Française de Normalisation (AFNOR). Recueil des normes françaises, Textiles Terminologie et Méthodes d'essais. Edité par AFNOR. 1^{ère} édition. Paris, 1975. p. 55-66.

[AFNOR, 1984]: AFNOR. Essais des étoffes- Détermination de la masse surfacique des tissus et des tricots. Norme Française, 1984, NF G07-150.

[AFNOR, 1995]: AFNOR. Détermination de la perméabilité à l'air des étoffes. Norme Française, 1995, NF G07-111 (norme NF EN ISO 9237).

[AFNOR, 1996]: AFNOR. Détermination de l'épaisseur des textiles et produits textiles. Norme Française, 1996, NF G07-153 (norme NF EN ISO 5084).

[ALAM, 2004]: 3rd International Conference on Electrical & Computer Engineering ICECE. A comparison of different constructive algorithms to design neural networks par ALAM K.R., HUDA S., AL-ASAD M.H. et ZAMAN M. Dhaka, Bangladesh: December 28-30, 2004.

[ALLEGRAUD, 2008] : ALLEGRAUD K. Décharge à Barrière Diélectrique de surface: physique et procédé. 218 p. Thèse: Physique: Ecole polytechnique, France: 2008.

[ALLAN, 2002]: ALLAN G., FOTHERINGHAM A. et WEEDALL P. The use of plasma and neural modeling to optimize the application of a repellent coating to disposable surgical garments. *AUTEX Research Journal*, 2002, vol.2, n°2, p. 64-68.

[AMARI, 1997]: AMARI S., MURATA N., MULLER K.R., FINKE M. et YANG H.H. Asymptotic statistical theory of overtraining and cross-validation. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1997, vol.8, n°5, p. 985-996.

[BAUVILLE, 2003]: VIIIe Congrès "Plasmas" de la Société Française de Physique. Traitement de tôles métalliques par décharge à barrière diélectrique monopolaire fonctionnant à pression atmosphérique par BAUVILLE G., CHOQUET E.P., LACOUR B., MICHEL E., PUECH V. et SILBERBERG E. Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN). CEA, Cadarache : Mai 5-7, 2003.

[BAE, 2006]: BAE P.H., HWANG Y.J., Jo H.J., KIM H.J., LEE Y., PARK Y.K., KIM J.G. et JUNG J. Size removal on polyester fabrics by plasma source ion implantation device. *Chemosphere*, 2006, vol.63, n°6, p. 1041-1047.

[BLUM, 1997]: BLUM A. L. et LANGELY P. Selection of relevant features and examples in machine learning. *Artificial Intelligence*, 1997, vol. 97, p. 245-271.

[BENDAOU, 2006] : BENDAOU A., TILMATINE A., MEDLES K., BLAJAN M., RAHLI M. et DASCALESCU L. Caractérisation expérimentale des électrodes couronne de type « dual ». *Journal of Electrostatics*, 2006, vol.64, p. 431-436.

[BERRIAH, 2000] : BERRIAH S. Contrôle de l'équilibre et de la trajectoire d'une bicyclette télécommandée par la logique floue. 88 p. Mémoire 2^e cycle: Université de Sherbook, Québec : 2000.

[BOGAERTS, 2002] : BOGAERTS A., NEYTS E., GIJBELS R. et MULLEN J.V.D. Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochimica Acta Part B*, 2002, vol.57, p. 609-658.

[BORCIA, 2006]: BORCIA G., ANDERSON C.A. et BROWN N.M.D. Surface treatment of natural and synthetic textiles using a dielectric barrier discharge. *Surface & Coating Technology*, 2006, vol.201, p. 3074-3081.

[BORCIA, 2007]: 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG), Plasma surface modification in relation to polymer properties par BORCIA C., BORCIA G., DUMITRASCU N. Prague, Czech Republic: July 15-20, 2007.

[BOUREK, 2005] : BOUREK Y. Détermination des conditions d'ionisation caractérisant le seuil de claquage de l'air par la logique floue. Mémoire de Magister: Electrotechnique: Université de Batna, France: 2005.

[BRATLETT, 1997]: BRATLETT P.L. For valid generalization, the size of the weights is more important than the size of the network. Department of System Engineering: Research School of Information Science and Engineering: Australian National University, 1997.

[CAI, 2003a]: CAI Z. et QIU Y. Effect of atmospheric plasma treatment on desizing of PVA on cotton. *Textile Research Journal*, 2003, vol.73, n°8, p. 670-674.

[CAI, 2003b]: CAI Z., QIU Y., HWANG Y.J., ZHANG C. et MCCORD M. The use of atmospheric plasma treatment in desizing PVA on viscose fabrics. *Journal of Industrial Textile*, 2003, vol.32, n°3, p. 223-232.

[CAI, 2006a]: CAI Z. et QIU Y. Dyeing properties of wool fabrics treated with atmospheric pressure plasmas. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol.109, p. 1257–1261.

[CAI, 2006b]: CAI Z. et QIU Y. The mechanism of air/oxygen/helium atmospheric plasma action on PV. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol.99, p. 2233–2237.

[CAI, 2008a]: CAI Z., HWANG Y.J., MCCORD M. et QIU Y. Desizing of cotton fabrics by helium atmospheric pressure plasma [en ligne], 2008, [Réf. du 13 février 2009].

Disponible sur:

<http://www.docstoc.com/docs/2986584>.

[CAI, 2008b]: CAI Z. et QIU Y. Effect on the anti-felt properties of atmospheric plasma treated wool. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol.7, p. 1142-1146.

[CAMPAGNE, 2009] : CAMPAGNE C. Fonctionnalisation massique et de surface de polymères appliquées aux textiles. Mémoire d’habilitation à diriger des recherches : Université des Sciences et Technologies de Lille1, Lille, France : 2009.

[CAO, 1997] : CAO M. Commande numérique de machines asynchrones par logique floue. Thèse : Faculté des études supérieures de l’université Laval, Québec: 1997.

[CERIA, 2008]: 8th World Textile Conference AUTEX. Modification of wool dyeing properties: a comparison between an atmospheric and a low pressure plasma treatment par CERIA A., MOSSOTTI R., MONTARSOLO A., ROMBALDONI F., DOTTI F., ROVERO G., FERRERO F., INNOCENTI R., SICARDI S. et MAZZUCHETTI G. Biella, Italia: June 24-26, 2008.

[CERNAKOVA, 2007]: CERNAKOVA L., SZABOVA R., WOLFOVA M., BUCEKL A. et CERNAKL M. Surface modification of polypropylene nonwoven after plasma activation at atmospheric pressure. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2007, vol.15, n°5 – 6, p. 64 - 65

[CHAIVAN, 2005]: CHAIVAN P., PASAJA N., BOONYAWAN D., SUANPOOT P. et VILAITHONG T. Low- temperature plasma treatment for hydrophobicity improvement of silk. *Surface & Coatings Technology*, 2005, vol.193, p. 356-360.

[CHEN, 1990]: CHEN S., BILLINGS S.A. et GRANT P.M. Non-linear system identification using neural network. *International Journal of Control*, 1990, vol.51, n°6, p.1191-1214.

[CHEN, 2003]: CHEN M. Modeling of plasma- enhanced chemical vapor deposition of nano-crystalline silicon carbide films using neural network. *IEEE NNS Student Summer Research Final Report* [en ligne], 2003.

Disponible sur:

http://iee-cis.org/_files/EAC_Research_2003_Report_Min.pdf.

[CHENG, 1996]: CHENG Y.B. et SYKULSKI J.K. Automated design and optimization of electromechanical actuators. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Network, Devices and Fields*, 1996, vol.9, n°1, p.59-69.

[CHO, 2003]: CHO J.S., HAN S., KIM K.H., BEAG Y.W. et KOH S.K. Surface modification of polymers by ion-assisted reaction. *Thin Solid Films*, 2003, vol°445, n°2, p. 332-341.

[COSTA, 2006]: COSTA T.H.C., FEITOR M.C., ALVES J.C., FREIRE P.B. et BENZERRA C.M. Effects of gaz composition during plasma modification of polyester fabrics. *Journal of Materials Processing technology*, 2006, vol.173, n°1, p. 40-43.

[COTTREL, 1995]: COTTREL M., GIRARD B., GIRARD Y., MANGEAS M. et MULER C. Neural modeling for time series: a statistical stepwise method for weight elimination. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1995, vol.6, n°6, p.1355-1364.

[CYBENKO, 1989]: CYBENKO G. Approximation by superpositions of a sigmoid function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 1989, vol.2, p. 303-314.

[DAILL, 2004]: DAILL G. et FOURNAUD B. Décharge couronne, applications et modélisation. 45 p. Projet : Energétique industrielle : Ecole supérieure d'ingénieurs de Poitiers, France [en ligne], 2004.

Disponible sur:

<http://membres.multimania.fr/antit/r/URE.pdf>.

[DARQUE-CERETTI, 2003] : DARQUE-CERETTI E., FELDER E. et HAUDIN J.M. Etude et analyse des surfaces de polymères. *Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites*, 2003, vol°2, n°AM3279, p.16-21.

[DAS, 2006]: DAS S. K. et BASUDHAR P. K. Undrained lateral load capacity of piles in clay using artificial neural network. *Computers and Goetechnics*, 2006, vol.33, n°8, p.454-459.

[DAS, 2008]: DAS S. K. et BASUDHAR P. K. Prediction of residual friction angle of clays using artificial neural network. *Engineering Geology*, 2008, vol.100, n°3-4, p.142-145.

[DENG, 2006]: IMACS Multiconferences on "Computational Engineering in Systems Applications" (CESA). A Fuzzy Logic Based Criterion For Selecting Relevant Process Parameters for Design of Nonwoven Products par DENG, X., VROMAN, P., ZENG, X. et KOEHL, L. Beijing, China: Octobre 4-6, 2006.

[DENG, 2007]: DENG, X., VROMAN, P., ZENG, X. et KOEHL, L. A Fuzzy Criterion for Selecting Relevant Process Parameters for the Development of Nonwoven Products. *Journal of Information and Computing Science*, 2007, vol.2, n°2, p. 93-102.

[DENG, 2008]: DENG X. Développement d'un outil d'aide à la conception des matériaux fibreux multifonctionnels par les techniques de calcul avancé. Thèse : Automatique et Informatique Industrielle : Université des Sciences et Technologies de Lille1, Lille, France : 2008.

[DIMOPOULOS, 1999] : DIMOPOULOS I., CHRONOPOULOS J., CHRONOPOULOU-SERELI A. et LEK S. Neural network models to study relationships between lead concentration in grasses and permanent urban descriptors in Athens city (Greece). *Ecological Modelling*, 1999, vol.120, n°2-3, p.157-165.

[DREYFUS, 1998]: DREYFUS G. Les réseaux de neurones. *Mécanique Industrielle et Matériaux* [en ligne], n°51, 1998.

Disponible sur :

http://www.neurones.espci.fr/Articles_PS/GAMI.pdf.

[DREYFUS, 2004] : DREYFUS G., MARTINEZ J.M., SAMUELIDES M., GORDEN M.B., BARRAU F., THIRIA S. et HERAULT L. Réseaux de neurones : Méthodologie et application. Eyrolles, 2^{ième} éditions 2004.

[ENACHE, 2007] : ENACHE I. Etude expérimentale et modélisation du transfert de matière dans des décharges de Townsend à pression atmosphérique en mélange HMDSO-N₂O-N₂ et SiH₄-N₂O-N₂. Thèse : Génie Electrique : Université Toulouse III- Paul Sabatier, Toulouse, France: 2007.

[FAUR-BRASQUET, 2003]: FAUR-BRASQUET C. et CLOIREC L. P. Modelling of the flow behavior of activated carbon cloths using a neural network approach. *Chemical Engineering and Processing*, 2003, vol.42, n°8-9, p.645-652.

[FERRANTE, 1999]: FERRANTE D., IANNACE S. et MONETTA T. Mechanical strength of cold plasma treated PET fibers. *Journal of Materials Science*, 1999, vol.34, n°1, p.175-179.

[FERREIRA, 2008]: 8th World textile conference AUTEX. Improvement of the hydrophily of PLA nonwoven by plasma treatment par FERREIRA M., SOLARSKI S., VROMAN P., DEVAUX E., LEROUX F., CAMPAGNE C. et PERWUELZ A. Biella, Italia: June 24-26, 2008.

[FLEURET, 2004]: FLEURET F. Fast binary feature selection with conditional mutual information. *Journal of Machine Learning Research*, 2004, vol.5, p.1531-1555.

[FOURNIER, 1975] : FOURNIER G., GOTCHIGUIAN P. et PIGACHE D. Caractérisation du plasma dans une décharge contrôlée par faisceau d'électrons. *Journal de Physique, Colloque C6*, 1975, vol.36, n°11, p. C6-35.

[FUNAHASHI, 1989]: FUNAHASHI. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural Networks*, 1989, vol.2, n°3, p. 183–192

[HAIROUR, 2007] : HAIROUR M. Etude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension. Thèse : Electronique, Optronique et Systèmes : Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc, France: 2007.

[HAGAN, 1994]: HAGAN M. T. et MENHAJ M. B. Training feedforward with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1994, vol.5, n°6, p. 989-993.

[HERBERT, 2007]: HERBERT T. Atmospheric-pressure cold plasma processing technology, in: Plasma technologies for textile. R. Shishoo (Eds.), Woodhead publishing in textiles, 2007, p. 79-128.

[HOCKER, 2002]: HOCKER H. Plasma treatment of textile fibers. *Pure and Apply Chemistry*, 2002, vol.74, n°3, p. 423-427.

[HOSSAIN, 2006a]: HOSSAIN M.M., HEGEMANN D., HERRMANN A.S. et CHABRECEK P. Contact angle determination on plasma- treated poly(ethylene terephthalate) fabrics and foils. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol.102, n°2, p. 1452-1458.

[HOSSAIN, 2006b]: HOSSAIN M.M., HERRMANN A.S. et HEGEMANN D. Plasma hydrophilization effect on different textile structures. *Plasma Processes and polymers*, 2006, vol.3, n°3, p. 299-307.

[HORNİK, 1994]: HORNİK K., STINHGOMBE M., WHITE H. et AUER P. Degree of approximation results for feedforward networks approximating unknown mappings and their derivatives. *Neural Computation*, 1994, vol.6, n°6, p. 1262-1275.

[HUI, 2004]: HUI C. L., LAU T. W. et NG S. F. Neural network prediction of human psychological perceptions of fabric hand. *Textile Research Journal*, 2004, vol.74, n°5, p. 375-383.

[HWANG, 2005]: HWANG Y.J., MCCORD M.G., AN J. S., KANG B.K. et PARK S. W. Effects of helium atmospheric pressure plasma treatment on low- stress mechanical properties of polypropylene nonwovens fabrics. *Textile Research Journal*, 2005, vol.75, n°11, p. 771-778.

[GARG, 2007]: GARG S., HURREN C. et KAYNAKC A. Improvement of adhesion of conductive polypyrrole coating on wool and polyester fabrics using atmospheric plasma treatment. *Synthetic Metals*, 2007, vol. 157, n°1, p. 41-47.

[GEVREY, 2003]: GEVREY M., DIMOPOULOS I. et LEK S. Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial network models. *Ecological Modelling*, 2003, vol.160, n°3, p. 249-264.

[GEVERY, 2006]: GEVERY M., DIMOPOULOS I. et LEK S. Two- way interaction of input variables in the sensitivity analysis of neural network models. *Ecological Modelling*, 2006, vol.195, n°1-2, p. 43-50.

[GEYTER, 2006]: GEYTER N.D., MORENT R. et LEYS C. Surface modification of a polyester non-woven with a dielectric barrier discharge in air at medium pressure. *Surface & Coating Technology*, 2006, vol.201, n°1, p. 2460-2466.

[GOH, 1995]: GOH A. T. C. Back- propagation neural networks for modeling complex systems, *Artificial Intelligence in Engineering*, 1995, vol.9, n°3, p. 143-151.

[GOODWIN, 2002]: GOODWIN A., HERBERT T., LEADLEY S. et SWALLOW F. Atmospheric pressure liquid deposition- a new route to high performance coatings. Dow Corning (Ireland) Ltd, Republic of Ireland [en ligne], 2002

disponible sur:

[http://www.ut.ee/hakone8/papers/T7/Goodwin\(TP\).pdf](http://www.ut.ee/hakone8/papers/T7/Goodwin(TP).pdf).

[GUAITELLA, 2006]: GAUITELLA O. Nature de la synergie plasma- photocatalyseur pour la destruction d'un composé organique volatil type : l'acétylène. Thèse: Physique: Ecole polytechnique, France: 2006.

[GUAY, 2001]: GUAY P. et FREDERIC L. Brûleur de CO par méthode plasma. Université de Québec: Institut National de Recherche Scientifique: Energie et Matériaux [en ligne], 2001.

Disponible sur:

http://www.nanotechnologies.qc.ca/propos/liens/articles/bruleur_plasma.pdf.

[JARRIGE, 2008]: JARRIGE J. Etude expérimentale des décharges électriques impulsionnelles nanoseconde à pression atmosphérique. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface. 169 p. Thèse : Université de Rouen : Physique : Energétique, France : 2008.

[JELIL, 2008]: 1st International Workshop on Systems Engineering Design & Applications. Using neural networks to predict polypropylene surface modification by atmospheric air-plasma par JELIL A. R., ZENG X., KOEHL L. et PERWUELZ A. Monastir, Tunisia: October 24-26, 2008.

[JELIL, 2009a]: 9th World Textile Conference AUTEX. Applications of atmospheric air-plasma treatments on polyester and viscose woven fabrics par JELIL A. R., ZENG X., KOEHL L. et PERWUELZ A. Izmir, Turkey: Mai 26-28, 2009.

[JELIL, 2009b]: Intelligent Textiles and Mass Customisation International conference-ITMC. Neural model of woven fabric surface modification by atmospheric air- plasma par JELIL A. R., ZENG X., KOEHL L. et PERWUELZ A. Casablanca, Morocco, November 12-14, 2009.

[JIMENEZ, 2008]: JIMENEZ A.B., BISTRITZ M. et SCHULZ E. Atmospheric air pressure plasma treatment of lignocellulosic fibers: Impact on mechanical properties and adhesion to cellulose acetate butyrate. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, n°1, p. 215-227.

[JIMEMEZ, 2002]: JIMENEZ C., MARTIN S., GHERARDI N., DURAND J., COT D. et MASSINES F. Etude de la formation de nano et micro particules dans une décharge à la pression atmosphérique. *Matériaux* [en ligne], 2002.

Disponible sur:

http://pem.utbm.fr/materiaux_2002/file/pdf/CM01096.PDF.

[JOY, 2006]: Proceedings of the Fourth International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA'06). A comparison of two contributive analysis methods applied to an ANN modeling facial attractiveness par JOY K.L. et PRIMEAUX D. Seattle, Washington: August 9-11, 2006.

[KAASTRA, 1996]: KAASTRA I. et BOYD M. Designing a neural network for forecasting financial and economic time series. *Neurocomputing*, 1996, vol.10, n°3, p. 215-236.

[KABAJEV, 2004]: KABAJEV M., PROSYCEVAS I., KAZAKEVICIUTE G. et VALIENE V. Plasma modification of structure and some properties of polyethylene therephthalate films and fibers. *Materials Science*, 2004, vol.10, n°2, p. 173-176.

[KAN, 1999]: KAN C.W., CAHN K. et YUEN C.W.M. Low temperature plasma on wool substrates: The effect of the nature of the gas. *Textile Research Journal*, 1999, vol. 69, n°6, p. 407-416.

[KAN, 1997]: KAN C.W., CAHN K. et YUEN C.W.M. Plasma modification of wool fabric: Effect on fabric properties, *JHKITA* [en ligne], 1997, p.24-32.

Disponible sur:

www.rjta.org/download.php?paper=1&paper_id=97_1_04.

[KAN, 2005]: KAN C.W. et YUEN C.W.M. Effect of low temperature plasma treatment on wool fabric properties. *Fibers and Polymers*, 2005, vol. 6, n°2, p. 169-173.

[KAN, 2006]: KAN C.W. et YUEN C.W.M. Low temperature plasma treatment for wool fabric. *Textile Research Journal*, 2006, vol.76, n°4, p. 309-314.

[KARAHAN, 2008]: KARAHAN H.A. et ÖZDOGAN E. Improvements of surface functionality of cotton fibers by atmospheric plasma treatment. *Fibers and polymers*, 2008, vol.9, n°1, p. 21-26.

[KARAHAN, 2009]: KARAHAN H.A., ÖZDOGAN E., DEMIR A., AYHAN H. et SEVENTEKIN N. Effects of atmospheric pressure plasma treatments on certain properties of cotton fabrics. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2009, vol.17, n°2, p. 19-22.

[KIM, 2002a]: KIM M.S. et KANG T.J. Dimensional and surface properties of plasma and silicone treated wool fabrics. *Textile Research journal*, 2002, vol.72, n°2, p. 113-120.

[KIM, 2002b]: KIM B., KWON S. K., PARK J. M., YOO S. W., PARK K. S., YOO I. K. et KIM B. W. Modeling a via profile etched in a CHF3/CF4 plasma using a neural network. *Journal of the Korean Physical Society*, 2002, vol.41, n°4, p. 433-438.

[KIM, 2004]: KIM III-S., SON J.S., LEE S. H. et YARLAGADDA P. K.D.V. Optimal design of neural networks for control in robotic arc welding. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2004, vol.20, n°1, p. 57-63.

[KOEHL, 1998]: KOEHL L. Conception et réalisation d'un estimateur de dimension fractale par utilisation de techniques floues. 121 p. Thèse : Automatique : Université des sciences et technologies de Lille1, Lille, France: 1998.

[KOEHL, 2003]: Multiconference Congress CESA'2003. Selection of nonwoven relevant structural parameters by integrating measured data human knowledge par KOEHL L., VROMAN P., CHEN T. et ZENG X. Lille, France: July 9-11, 2003.

[KOEHL, 2006]: KOEHL L. Optimisation de la qualité et du confort des produits textiles par exploitation de données physiques et de la connaissance humaine. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches: Université des Sciences et Technologies de Lille1, Lille, France: 2006.

[KRASNOPOLSKY, 2002]: KRANOSPOLSKY V. M., CHALIKOV D. V. et TOLMAN H. L. A network technique to improve computational efficiency of numerical oceanic models. *Ocean Modelling*, 2002, vol.4, n°3, p. 363-383.

[KULKY, 2008]: 8th World Textile Conference AUTEX. Textile fibres treatment with DBD atmospheric plasma discharge par KULKY I., SCAPINELLO M. et STEFAN M. Biella, Italia: June 24-26, 2008.

[KWOK, 1997]: KWOK T.Y. et YEUNG D.Y. Constructive algorithms for structure learning in feedforward neural networks for regression problems. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1997, vol.8, n°3, p. 630-645.

[LABERGUE, 2005]: LABERGUE A. Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas- Application au contrôle de décollements et d'écoulements. 244 p. Thèse: Génie Electrique: Université de Poitiers, France: 2005.

[LARSEN, 1999]: Proceedings of the IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing IX. An optimal data split for generalization estimation and model selection par LARSEN J. et GOUTTE C. Piscataway, *New Jersey: IEEE*, 1999, p. 225-234.

[LEARY, 1998]: LEARY P. et GALLIARI P. Feature selection with neural network. Université Paris 6, Paris, France [en ligne], 1998.

Disponible sur:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.54.4570>.

[LE CUN, 1988]: Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School. A theoretical framework for back-propagation par LE CUN Y. Pittsburgh, PA, Morgan Kaufmann [en ligne], 1988, p. 21-28.

Disponible sur:

<http://yann.lecun.com/exdb/publis/pdf/lecun-88.pdf>.

[LENARD, 1995]: LENARD M.J., ALAM P. et MADEY G.R. The application of neural networks and a qualitative response model to the auditor's going concern uncertainty decision. *Decision Sciences*, 1995, vol.26, n°2, p. 209-227.

[LERIDE, 2006]: LERIDE C.L.F.D. Etude de la pulvérisation assistée en air d'une nappe liquide et influence d'un vent ionique sur les instabilités hydrodynamiques. Thèse : Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, France: 2006.

[LEROUX, 2006]: LEROUX F., PERWUELZ A., CAMPAGNE C. et BEHARY A. Atmospheric air-plasma treatments of polyester textile structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2006, vol.20, n°9, p. 939-957.

[LEROUX, 2007]: LEROUX F. Etude des traitements par plasma à pression atmosphérique- Applications à l'industrie textile. 225 p. Thèse : Science des Matériaux : Université de Valenciennes et du Hainaut- Cambresis, France: 2007.

[LEROUX, 2008]: LEROUX F., CAMPAGNE C., PERWUELZ A. et GENGEMBRE L. Fluorocarbon nano-coating of polyester fabrics by atmospheric air plasma with aerosol. *Applied Surface Science*, 2008, vol. 254, n°13, p. 3902-3908.

[LEROUX, 2009]: LEROUX F., CAMPAGNE C., PERWUELZ A. et GENGEMBRE L. Atmospheric air plasma treatment of textile materials. Textile structure influence on surface oxidation and silicon resin adhesion. *Surface & Coatings Technology*, 2009, vol.203, n°20-21, p. 3178-3183.

[LIANG, 2007]: LIANG X. Removal of hidden neurons in multilayer perceptrons by orthogonal projection and weight crosswise propagation, *Neural Computing & Applications*, 2007, vol.16, n°1, p. 57-68.

[LIU, 2006]: LIU L., JIANG Q., ZHU T., GUO X., SUN Y., GUAN Y. et QIU Y. Influence of moisture regain of aramid fibers on effects of atmospheric pressure plasma treatment on improving adhesion with epoxy. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol.102, n°1, p. 242-247.

[LIVINGSTONE, 1997]: LIVINGSTONE D.J., MANALLACK D.T. et TETKO I.V. Data modeling with neural networks: advantages and limitations. *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 1997, vol.11, n°2, p. 135-142.

[LUCEA, 2006]: LUCEA M. Modélisation dynamique par réseaux de neurones et machines à vecteurs supports : contribution à la maîtrise des émissions polluantes de véhicules automobiles. Thèse : Electronique: Université Paris 6, Paris, France : 2006.

[LUO, 2007]: LUO X.L., LIAO L.Z. et TAM H.W. Convergence analysis of the Levenberg-Marquardt method. *Optimisation Methods and Software*, 2007, vol.22, n°4, p. 659-678.

[MA, 2003]: MA L. et KHORASANI K. Constructive feedforward neural networks using Hermite polynomial activation functions. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2003, vol.16, n°4, p. 821-833.

[MACKAY, 1992]: MACKAY D.J.C. Bayesian methods for adaptive models. Thesis: Philosophy: California Institute of Technology, Pasadena, California [en ligne], 1992.
Disponible sur:
<http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/thesis.pdf>.

[MAGNIER, 2007]: MAGNIER P. Etude expérimentale du contrôle d'écoulements aérodynamiques subsoniques par action de plasmas froids surfaciques à pression atmosphérique. 218p. Thèse : Mécanique des fluides- Thermique- Energétique- Combustion: Université d'Orléans, France: 2007.

[MAMDANI, 1975]: MAMDANI E.H. et ASSILIAN S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1975, vol.7, n°1, p. 1-13.

[MATEO-VELEZ, 2006]: MATEO-VELEZ J.C. Modélisation et simulation numérique de la génération de plasma dans les décharges couronnes et son interaction avec l'aérodynamique. 180p. Thèse : Dynamique des fluides: Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, France: 2006.

[MCCORD, 2002]: MCCORD M.G., HWANG Y.J., HAUSER P.J., QIU Y., Cuomo J.J., Hankins O.E., Bourham M.A. et Canup L.K. Modifying nylon and polypropylene fabrics with atmospheric pressure plasma. *Textile Research Journal*, 2002, vol.72, n°6, p. 491-498.

[MEIRELES, 2003]: MEIRELES M.R.G., ALMEIDA P.E.M. et SIMOES M.G. A comprehensive review for industrial applicability of artificial neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, vol.50, n°3, p. 585-601.

[MERBAHI, 2004]: MERBAHI N. Luminescence de l'argon et du xénon dans les décharges à barrières diélectriques mono-filamentaires. 203 p. Thèse : Génie Electrique: Université Paul Sabatier de Toulouse, France: 2004.

[MORE, 1978]: MORE J. J. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. *Lectures Notes in Mathematics 630: Numerical Analysis*, 1978, p. 105-116.

[MORENT, 2007]: MORENT R., GEYTER N.D., LEYS C., GENGEMBRE L. et PAYEN E. Surface modification of non- woven textiles using a dielectric barrier discharge operating in air, helium and argon at medium pressure. *Textile Research Journal*, 2007, vol.77, n°7, p. 471-488.

[NASADIL, 2008]: II Central European Symposium on Plasma Chemistry 2008. Plasma in textile treatment par NASADIL P. et BENSOVSKY P. B. Czech Republic: August 31-September 04, 2008.

[NETO, 1989]: NETO J.L.D.S. Contribution aux algorithmes d'adaptation par logique floue appliqués à la commande de la machine synchrone à aimants permanents. Thèse : Faculté des Etudes Supérieures : Université Laval, Québec, 1989.

[OKTEM, 2000]: OKTEM T., SEVENTEKIN N., AYHAN H. et PISKIN E. Modification of polyester and polyamide fabrics by different in situ plasma polymerization methods. *Turkish Journal of Chemistry* [en ligne], 2000, vol.24, p. 275- 285.

Disponible sur:

<http://journals.tubitak.gov.tr/chem/issues/kim-00-24-3/kim-24-3-9-9907-11.pdf>.

[OLDEN, 2002]: OLDEN J.D. et JACKSON D.A. Illuminating the "black box": a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks. *Ecological Modelling*, 2002, vol.154, n°2, p. 135-150.

[OLDEN, 2004]: OLDEN J.D., JOY M.K., et DEATH R.G. An accurate comparison of methods for quantifying variable importance in artificial neural network using simulated data. *Ecological Modelling*, 2004, vol.178, n°3-4, p. 389-397.

[OLDEN, 2008]: OLDEN J. D., LAWLER J. J. et POFF N. L. Machine learning methods without tears: a primer for ecologists, *The Quartely Review of Biology*, 2008, vol.83, n°2, p. 171-193.

[OUSSAR, 1998]: OUSSAR Y. Réseaux d'ondelettes et réseaux de neurones pour la modélisation statique et dynamique de processus. 183p. Thèse: Robotique: Université Paris VI, Paris, France: 1998.

[PANG, 2006]: PANG H. Dépoussiérage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle (terre) rarefiée (planète Mars). 190p. Thèse : Energétique physique: Université Joseph Fourier, France: 2006.

[PAPPAS, 2006]: PAPPAS D., BUJANDA A., DEMAREE J.D., HIRVONEN J.K., KOSIK W., JENSEN R. et MCKNIGHT S. Surface modification of polyamide fibers and films using atmospheric plasmas. *Surface & Coatings technology*, 2006, vol. 201, n°6, p. 4384-4388.

[PARIZAU, 2004]: PARIZAU M. Le perceptron multicouche et son algorithme de rétropropagation des erreurs. Département de génie électrique et de génie informatique: Université Laval [en ligne], 2004.

Disponible sur :

<http://wcours.gel.ulaval.ca/2009/h/19968/default/5notes/NotesDeCours/RetroPerceptron.pdf>.

[PARK, 1996]: PARK Y. R., MURRAY T.J. et CHEN C. Predicting sun spots using a layered perceptron neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1996, vol.7, n°2, p. 501-505.

[PEDECKER, 2005]: PEDECKER A.P., GOETHALS P.L.M., D'HEYGERE T., GEVREY M., LEK S. et PAUW N.D. Application of artificial neural network models to analyze the relationships between gammarus puplex L. (crustacea, amphipoda) and river characteristics. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, vol.111, n°1-3, p. 223-241.

[PERSONNAZ, 2003]: PERSONNAZ L. et RIVALS I. Réseaux de neurones formels pour la modélisation, la commande et la classification. CNRS éditions, Paris, 2003.

[PERWUELZ, 2007]: Colloque Franco-Tunisien « Les milieux poreux » CFT'07. Mouillage et phénomènes de surface dans les structures textiles par PERWUELZ A., CAMPAGNE C. et LEWANDOWSKI M. Sousse, Tunisie: Avril 13-15, 2007.

[PICHAL, 2007]: 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG). Wettability of polyester fabric controlled by a dielectric barrier discharge par PICHAL J., KLENKO Y. et AUBRECHT L. Prague, Czech Republic: July 15-20, 2007.

[PICHAL, 2006]: KLENKO Y., PICHAL J. et AUBRECHT L. Atmospheric DBD discharge modification of polyester fabric. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2006, n°6, Series: Plasma Physics (12), p. 195-197.

[PIRAMUTHU, 1994]: PIRAMUTHU S., SHAW M. et GENTRY J. A classification approach using multi-layered neural networks. *Decision Support Systems*, 1994, vol.11, n°5, p. 509-525.

[PRECHELT, 1998]: PRECHELT L. Automatic early stopping using cross validation: quantifying the criteria, *Neural Networks*, 1998, vol.11, n°4, p. 761-767.

[QUINLIN, 1986]: QUINLIN J.R. Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1986, vol.1, n°1, p. 81-106.

[RACOCEANU, 2006]: RACOCEANU D. Contribution à la surveillance des Systèmes de Production en utilisant les Techniques de l'Intelligence Artificielle. 245p. Mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches: Université de Franche- Comté, Besançon, France: 2006.

[RADETIC, 2009]: RADETIC M., JOVANCIC, P., PUAC N., PETROVIC Z.L. et SAPONJIC Z. Plasma induced decolorization of indigo-dyed denim fabrics related to mechanical properties and fiber surface morphology. *Textile Research Journal*, 2009, vol. 79, n°6, p. 558–565.

[RAHEL, 2000]: RAHEL J., CERNAK M., HUDEC I., STEFECKA M., KANDO M. et CHODAK I. Surface modification of polyester monofilaments by atmospheric- pressure nitrogen plasma. *Plasma and Polymers*, 2000, vol.5, n°3-4, p. 119-127.

[RAKOTOMALALA, 2009]: RAKOTOMALA R. Pratique de la régression linéaire multiple- Diagnostic et sélection des variables. Université Lumière Lyon 2 [en ligne], 2009, [Réf. du 20 septembre 2009]

Disponible sur :

http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/La_regression_dans_la_pratique.pdf.

[RASHED, 2009]: RASHED U.M., AHMED H., AL-HALWAGY A. et GARAMOON A.A. Surface characteristics and printing properties of PET fabric treated by atmospheric dielectric barrier discharge plasma. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2009, vol. 45, n°1, 7 p.

[RADETIC, 2007]: RADETIC M., JOVANCIC P., PUAC N. et PETROVIC Z.L. Environmental impact of plasma application to textiles. *Journal of Physics: Conference Series* [en ligne], 2007, vol° 71, 11 p.

Disponible sur:

http://www.iop.org/EJ/article/1742-6596/71/1/012017/jpconf7_71_012017.pdf?request-id=635916dd-4a05-4fbd-ab53-f01a3ee197eb.

[REDOLFI, 2007]: REDOLFI M. Etude de l'oxydation de différents types d'hydrocarbures par des procédés utilisant des techniques de décharges électriques non-thermiques à pression atmosphérique : application à la problématique du démarrage à froid. 262 p. Thèse : Génie des Procédés: Université Paris XIII, France: 2007.

[REGNER, 2008]: REGNER M. What is principal component analysis. *Nature Biotechnology*, 2008, vol.26, n°3, p. 303-304.

[REN, 2003]: Proceeding of the Second Conference on Machine Learning and Cybernetics. The research on an algorithm for special two- hidden- layer artificial neural networks par REN J. D., HUANG H. Y. et BAO J. Xi'an, China: November 2-3, 2003.

[RIVALS, 1995]: RIVALS I., PERSONNAZ L. et DREYFUS G. Modélisation, classification et commande par réseaux de neurones : Principes fondamentaux, méthodologies de conception industrielle. *Récent progrès en génie de procédés*, 1995, vol.9, n°37, p. 1-37.

[RIVALS, 1996]: RIVALS I. Les réseaux de neurones formels pour le pilotage de robots mobiles. FLUX, revue de l'association amicale Les ingénieurs SUPELEC : la robotique mobile ; la fonction achats-logistique, n°178, Septembre-Octobre 1996, ISSN 0766-3536.

[RIVALS, 2003]: RIVALS I. et PERSONNAZ L. Neural- network construction and selection in nonlinear modeling. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2003, vol.14, n°4, p. 804-819.

[ROSACE, 2008]: ROSACE G. et CANTON R. Influence of low- temperature plasma conditions on wicking properties of PA/PU knitted fabric. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol. 107, n°6, p. 3702-3706.

[SAMANTA, 2009]: SAMANTA K.K., JASSAL M. et ARGAWAL A.K. Improvement in water and oil absorbency of textile substrate by atmospheric pressure cold plasma treatment. *Surface & Coatings Technology*, 2009, vol. 203, n°10-11 p. 1336-1342.

[SARRA-BOURNAT, 2007]: SARRA-BOURNAT C. Design et réalisation d'un réacteur plasma à pression atmosphérique pour des traitements de surfaces dans le domaine des biomatériaux. Mémoire: Génie des Mines, Métallurgie et Matériaux: Université Laval, Québec, 2007.

[SENTIES, 2007]: SENTIES B.O. Méthodologie d'aide à la décision multicritères pour l'ordonnancement d'ateliers discontinus. 156 p. Thèse : Génie des procédés et de l'environnement: Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France: 2007.

[SINZINKAYO, 2000]: SINZINKAYO A. Application de la logique floue au choix d'une méthode d'assemblage. Mémoire : Université de Montréal, Canada: 2000.

[SUBLET, 2007]: SUBLET A. Caractérisation de décharges à barrières diélectriques atmosphériques et sub-atmosphériques et application à la déposition de couches d'oxyde de silicium. Thèse : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, France: 2007.

[SHARNINA, 2004]: SHARNIN L.V. Low- temperature plasma as the basis for creation of modern textile chemical technologies. *Fibre Chemistry*, vol.36, n°6, 2004.

[SHENTON, 2001]: SHENTON M.J. et STEVENS G.C. Surface modification of polymer surfaces : atmospheric plasma versus vacuum plasma treatments. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, vol.34, p. 2761-2768.

[SHINHA, 2009]: SINHA E. Effect of cold plasma treatment on macromolecular structure, thermal and mechanical behavior of jute fiber. *Journal of industrial Textiles*, 2009, vol. 38, n°4, p. 317-339.

[SHIN, 2006]: SHIN Y., SON K., YOO D.II, HUDSON S., MCCORD M., MATTHEWS S. et WHANG Y.J. Functional finishing of nonwovens fabrics. I. Accessibility of surface modified PET spunbond by atmospheric pressure He/O₂ plasma treatment. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol.100, n°6, p. 4306-4310.

[SHIN, 2008]: SHIN Y., YOO D.II. Surface characterization of PET nonwoven fabric treated by He/O₂ atmospheric pressure plasma. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol.108, n°2, p. 785-790.

[SCHULY, 2002]: CHULY P. Asservissement par logique floue [en ligne], 2002.

Disponible sur :

http://www.eig.ch/fileadmin/laboratoires/systeme_asservis/SAth121.pdf.

[SOTO, 2008]: SOTO A.J., CECCHINI R.L., VAZQUEZ G.E. et PONZONI I. A wrapper-based feature selection method for ADMET prediction using Evolutionary computing. *Lectures Notes in Computer Science*, 2008, vol.4973, p. 188-199.

[SUN, 2005]: SUN D. et STYLIOS G.K. Investigating the plasma modification of natural fiber fabrics- The effect on fabric surface and mechanical properties. *Textile Research Journal*, 2005, vol.75, n°9, p. 639-644.

[SUN, 2004]: SUN D. et STYLIOS G.K. Effect of low temperature plasma treatment on the scouring and dyeing of natural fabrics. *Textile Research Journal*, 2004, vol. 74, n°9, p. 751-756.

[SUN, 2006]: SUN D. et STYLIOS G. K. Fabric surface properties affected by low temperature plasma treatment. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 173, p. 172-177.

[SUPASAI, 2007]: SUPASAI T., HODAK S. K. et PAOSAWATYANYONG B. Effect of SF₆ plasma treatment on hydrophobicity improvement of fabrics. *Jurnal Fizik Malaysia* [en ligne], 2007, vol.28, n°1-2, p. 1-6.

Disponible sur:

http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~hsatreer/data/pdf/overall_plasma.pdf.

[TATTKKE, 2009]: TAKKE V., BEHARY N., PERWUELZ A. et CAMPAGNE C. Studies on the atmospheric air- plasma treatment of PET (Polyethylene Terephthalate) woven fabrics: effect of process parameters and of ageing. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 114, p. 348–357.

[TENDERO, 2005] : TENDERO C. Torche plasma micro-onde à la pression atmosphérique : application au traitement de surfaces métalliques. 196 p. Thèse : Chimie, Chimie Physique: Université de Limoges, France: 2005.

[THAWONMAS, 1997]: THAWONMAS R. A novel approach to feature selection based on analysis of class regions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- Part B: Cybernetics*, 1997, vol.27, n°2, p. 196- 207.

[**THOMAS, 1992**]: THOMAS D.W., WILLIAMS C.F., RUMSBY P.T. et GOWER M.C. Surface modification of polymers and ceramic induced by excimer laser radiation. *Laser Ablation of Electronics Materials Basic Mechanismas and Applications*, Elsevier Science Publishers [en ligne], 1992, 8 p.

Disponible sur:

<http://exitech.org/pdfFiles/Surface%20modification%20of%20polymers%20and%20ceramics.pdf>.

[**THOMAS, 2008**]: 10th International Conference on Computer Modelling and Simulation, EUROSIM'08. Simulation reduction models approach using neural network par THOMAS P., CHOFFEL D. et THOMAS A. Cambridge: United Kingdom, 2008.

[**TOUZET, 1992**]: TOUZET C. Les réseaux de neurones artificiels : introduction au connexionnisme. Cours, exercices et travaux pratiques [en ligne], 1992.

Disponible sur :

http://www.cavalex.com/pdf/livre_touzet.pdf.

[**TZENG, 2005**]: IEEE Visualization. Opening the black box- data driven visualization of neural networks par TZENG F.Y. et MA K.L. Minneapolis, MN, USA: October 23-28, 2005.

[**UYAMA, 1998**]: UYAMA Y., KATO K K. et IKADA Y. Surface modification of polymers by grafting. *Advances in Polymer Science*, 1998, vol°37, p. 1-39.

[**VALT, 2008**] : VALT A. Etude de deux procédés de polymérisation d'un précurseur gazeux dans un plasma radiofréquence basse pression et liquide déposé sur un substrat activé par décharge à barrière diélectrique à pression atmosphérique : application aux propriétés antifouling. Thèse: Génie des Procédés et Technologies Avancées: Université Pierre et Marie Curie, France: 2008.

[**VANDENCASTEELE, 2008**]: VANDENCASTEELE N. Etude du rôle des espèces constitutives d'un plasma pour la fonctionnalisation de surfaces polymériques. Thèse: Sciences: Université Libre de Bruxelles, Belgique: 2008.

[**VATUNA, 2004**]: VATUNA T., SPATENKA P., PICHAL J., KOLLER J., AUBRECHT L. et WIENER J. PES fabric plasma modification. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2004, vol.54, Sup.3, p. C475-C482.

[**VERIKAS, 2002**]: VERIKAS A. et BACUASKIENE M. Feature selection with neural networks. *Pattern Recognition Letters*, 2002, vol.23, p. 1323-1335.

[**VERSCHUREN, 2005**]: VERSCHUREN J., Van HERZELE P., CLERK D. K. et KIEKENS P. Influence of fiber surface purity on wicking properties of needle-punched nonwoven after oxygen plasma treatment. *Textile Research Journal*, 2005, vol. 75, n°5, p. 437-441.

[**VESEL, 2010**]: VESSEL A., MOZETIC M., STRNAD S., PERSIN Z., STANA-KLEINSCHKE K. et HAUPTMAN N. Plasma modification of viscose textile. *Vacuum*, 2010, vol.84, p. 79-82.

[VRABIC, 2007]: VRABIC U., JESIH A. et SVETEC D.G. Physical and absorptive changes in plasma treated viscose fibers. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2007, vol. 15, n°5 – 6, p. 64 – 65.

[WANG, 1994]: WANG F. The use of artificial neural networks in a geographical information system for agricultural land-suitability assessment. *Environment and Planning A*, 1994, vol.26, n°2, p. 265-284.

[WANG, 2005]: WANG W., PIETER H.A.J.M., GELDER V. et VRIJLING J.K. Some issues about generalization of neural networks for time series predictions. *Lectures Notes in Computer Science*, 2005, vol.3697, p. 559-564.

[WANG, 2007a]: WANG C.X., REN Y. et QIU Y.P. Penetration depth of atmospheric pressure plasma surface modification into multiple layers of polyester fabrics. *Surface & Coatings technology*, 2007, vol. 202, p. 77-83.

[WANG, 2007b]: Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics. Neural networks model of polypropylene surface modification by air plasma par WANG C., WANG X. et HE X. Jinan, China: August 18-21, 2007.

[WANG, 2007c]: WANG J. et ZHANG W. Predicting bond qualities of fabric composites after wash and dry wash based on principal- BP neural network model. *Textile Research Journal*, 2007, vol.77, n°3, p. 142-150.

[WANG, 2008a]: WANG C.X., LIU Y., XU H.L., REN Y. et QIU Y.P. Influence of atmospheric pressure plasma treatment time on penetration depth of surface modification into fabric. *Applied Surface Science*, 2008, vol.254, p. 2499-2505.

[WANG, 2008b]: WANG T., WANG C. et QIU Y. Surface modification of ultra high modulus polyethylene fibers by an atmospheric pressure plasma jet. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol.108, p. 25-33.

[WANG, 2008c]: WANG C., ZHU L. et QIU Y. Laser scanning confocal microscope characterization of dye diffusion in nylon 6 fibers treated with atmospheric pressure plasmas. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol.107, p. 1471-1478.

[WEI, 2006]: Wei Q., Li Q., Wang X., Huang F. et Gao W. Dynamic water absorption behavior of plasma- treated polypropylene nonwovens. *Polymer Testing*, 2006, vol.25, p. 717–722.

[WEIGEND, 1990]: WEIGNED A.S., HUBERMAN B.A. et RUMELHART D.E. Predicting the future: A connectionist approach. *International Journal of Neural Systems*, 1990, vol.1, n°3, p. 193-209.

[WONG, 1999]: WONG K.K., TAO X.M., YUEN C.W.M. et YEUNG K.W. Low temperature plasma treatment of linen. *Textile Research Journal*, 1999, vol. 69, n°11, p. 846-855.

[WONG, 2000]: WONG W., CHAN K., YEUNG K.W. et LAUZ K.S. Pulsed UV laser and low temperature plasma modification on microfiber: Effect on the dyeing properties. *Journal of textile engineering*, 2000, vol.46, n°2, p. 32-41.

[WONG, 2003]: WONG A.S.W., LI Y., YEUNG P.K.W. Neural network predictions of human psychological perceptions of clothing sensory comfort. *Textile Research Journal*, 2003, vol.73, n°1, p. 31-37.

[WROBEL, 1978]: WROBEL A.M., KRYSZEWSKI M., RAKOKOWSKI W., PKONIEWSKI M. et KUBACKI Z. Effect of plasma treatment on surface structure and properties of polyester fabric. *Polymer*, 1978, vol. 19, n°8, p. 908- 912.

[XU, 2003]: XU W. et LIU X. Surface modification of polyester fabric by corona discharge irradiation. *European Polymer Journal*, 2003, vol.39, p. 199-202.

[XU, 2009]: XU H., PENG S., WANG C., YAO L., SUN J., JI F. et QIU Y. Influence of absorbed moisture on antifelting property of wool treated with atmospheric pressure plasma. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 113, p. 3687-3692.

[YAMAN, 2009]: YAMAN N., OZDOGAN E., KOCUM I. C., AYHAN H., OKTEM T. et SEVENTEKIN N. Improvement surface properties of polypropylene and polyester fabrics by glow discharge plasma system under atmospheric condition. *Tekstil ve Konfeksiyon* [en ligne], 2009, vol.1, p. 45-51.

Disponible sur:

www.tekstilvekonfeksiyon.org/pdf/20090505092811.pdf.

[YENIAY, 2002]: YENIAY O., GOKTAS A. A comparison of partial least square regression with other prediction methods. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 2002, vol.31, p. 99-111.

[YEUNG, 2002]: Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Hidden neuron pruning for multilayer perceptrons using a sensitivity measure par YEUNG D.S., ZENG X.Q. Beijing, China: November 4-5, 2002.

[YIP, 2002]: YIP J., CHAN K., SIN K.M. et LAU K.S. Low temperature plasma- treated nylon fabrics. *Journal of Materials Processing technology*, 2002, vol.123, p. 5-12.

[ZADEH, 1965]: ZADEH L.A, Fuzzy sets. *Informations and control*. 1965, vol.8, p. 338-353.

[ZEMLJIC, 2009]: ZEMLJIC L.F., PERSIN Z. et STENIUS P. Improvement of chitosan absorption onto cellulosic fabrics by plasma treatment, *Biomacromolecules* [en ligne], 2009, 8 p. [Réf du 10 Avril 2009].

Disponible sur:

Downloaded from <http://pubs.acs.org>.

[ZENG, 2009]: ZENG X., SHAO J., WANG Y. et ZHONG S. A sensitivity based approach for pruning architecture of Madalines. *Neural Computing & Applications*, 2009, vol.18, p. 957-965.

[ZHONGFU, 2007]: ZHONGFU R., XIAOLIANG T., HONG'EN W. et GAO Q. Continuous modification treatment of polyester fabric by Ar-O₂ (10:1) discharge at atmospheric pressure. *Journal of Industrial textiles*, 2007, vol.37, n°1, p. 43-53.

Annexes

Annexe A: Le polyester.....	240
Annexe B: La viscose.....	245
Annexe C: Angle de contact.....	248
Annexe D: Historique des réseaux de neurones.....	252
Annexe E: Les fonctions d'activation.....	254

Annexe A: Le polyester

Le polyester est actuellement la fibre synthétique la plus importante au niveau mondial et il se situe à la deuxième place mondiale derrière le coton, non seulement en terme de production, mais aussi en ce qui concerne son utilisation finale. Les tableaux A-1 et A-2 illustrent l'évolution de la production de polyester et de coton depuis 1960.

Année	Production de polyester	Production de coton
1960	122	10113
1965	456	11884
1970	1645	11784
1975	3366	11723
1980	5127	13844
1985	6502	17383
1990	8621	18997
1995	11948	18607
2001	19279	19814

Tableau A- 1 : Production mondiale de Polyester et de Coton entre 1960 et 2001 (en milliers de tonnes)

Année	Production de polyester	Production de coton
1960	0,82	67,72
1965	2,42	63,09
1970	7,53	53,96
1975	14,06	48,97
1980	17,31	46,73
1985	18,32	48,97
1990	21,51	47,40
1995	27,46	45,84
2001	39,22	40,31

Tableau A- 2 : Production mondiale de Polyester et de Coton entre 1960 et 2001 (en pourcentage par rapport à la production mondiale totale)

On peut constater que la production mondiale de polyester est passée de moins 1 % en 1960 à 39 % en 2001. Ce succès très rapide peut s'expliquer par son large éventail d'application, que ce soit dans le secteur de l'ameublement, de l'industrie, de l'automobile ou de l'habillement. A titre d'exemple, le polyester représente 70 % des fibres synthétiques utilisées dans le vêtement (vêtements de sport, maillots de bain, tenues, chemises, chemisiers, etc). Il est souvent utilisé en mélange avec d'autres fibres, notamment le coton et la laine.

Fabrication de polyester

Le polyester est fabriqué par polycondensation de deux monomères :

- L'acide téréphtalique, préparé à partir de benzène.
- L'éthylène glycol préparé à partir de l'éthylène.

La polymérisation de ces deux monomères conduit à une matière textile filable connue sous le nom de polyester (PET) ou tergal. La Figure A-1 montre la structure chimique du monomère du PET. Les fibres obtenues sont formées de macromolécules linéaires résultant de l'enchaînement de plusieurs molécules d'ester. Le polyester doit ainsi son nom à cette construction : « poly » (beaucoup) + « esters » (le type de liaison).

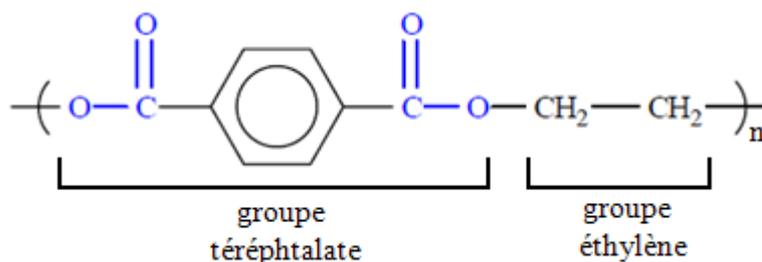


Figure A- 1 : Formule chimique du monomère du PET

La polymérisation s'effectue à l'autoclave, sous vide et à température élevée. Le polycondensat est coulé sous forme d'un ruban qui se solidifie et qui passe ensuite dans un granulateur pour être découpé en grains réguliers, puis envoyé dans un silo.

Au moment de filage, les grains de polymère sont acheminés dans des fondoirs où ils sont fondus. Le polymère fondu est ensuite conduit vers la filière où il est soumis à une pression qui le fait passer à travers les trous de la filière. En sortie de filière, les filaments sont refroidis par un courant d'air, puis réunis pour former le fil lorsque la température

devient inférieure à la température de transition vitreuse T_g . Ensuite, les fils refroidis sont enroulés sur des bobines.

Les fils issus du processus de filage ne présentent pas les caractéristiques d'orientation moléculaire et de cristallinité nécessaire pour obtenir les propriétés recherchées, notamment mécaniques. On procède donc à l'opération d'étirage qui consiste à appliquer une déformation longitudinale de manière à étirer les filaments jusqu'à plusieurs fois leur longueur initiale (4 à 5 fois). Cette opération s'effectue à chaud et provoque une structure fibreuse présentant un haut degré de cristallinité, donc d'excellentes propriétés mécaniques à sec qui restent presque égales au mouillé à cause de la très faible hygroscopicité du polyester.

Propriétés du PET

Les propriétés des fibres de polyester dépendent fortement de la structure de la fibre, du poids moléculaire de polymère et des conditions dans lesquelles le fil est fabriqué.

Propriétés physiques, mécaniques et thermiques

Le pourcentage de cristallinité est un paramètre important pour la détermination des propriétés physiques d'une fibre. La densité de PET amorphe est $1,33 \text{ g/cm}^3$ mais au fur et à mesure que l'orientation et la cristallinité augmentent cette densité peut aller jusqu'à $1,38 - 1,40 \text{ g/cm}^3$. La valeur obtenue pour un PET purement cristallin est de $1,455 \text{ g/cm}^3$.

Les fibres de polyester ont un très faible pouvoir absorbant (0,5 %). Ces fibres possèdent une stabilité dimensionnelle élevée. Elles résistent bien à la chaleur et à la dégradation de la lumière. Elles présentent également une très grande résistance à l'usure, aux frottements et l'abrasion. Le Tableau A-3 illustre les propriétés dynamométriques des fibres et fils de polyester.

	Fibres discontinus		Fils continus	
	Fibres normales	Fibres bas pilling	Fils normaux	Fils haute ténacité
Ténacité (g/tex)	40 à 60	20 à 30	40 à 60	60 à 80
Allongement de rupture	15 à 30	30 à 55	15 à 30	7 à 15

Tableau A- 3 : Propriétés dynamométriques des fibres et fils de PET

Etant donné sa structure chimique, le polyester est à la fois hydrophobe et oléophile. Le caractère hydrophobe apporte la répulsion à l'eau et un séchage rapide mais en raison de l'oléophilicité, les taches d'huile et de graisse restent difficiles à enlever. Les tissus de polyester présentent une tendance à l'auto-défroissabilité et à la rétention du pli.

En outre, le polyester offre une bonne isolation thermique. Les valeurs de la température de transition vitreuse (T_g) et de la température de fusion (T_f) sont élevées. Elles se situent généralement autour de 80°C et de 250°C respectivement.

Propriétés chimiques

Le polyester est très peu sensible à l'action des acides minéraux et organiques dans des conditions de concentration et de température peu élevée. Cependant, il est détérioré par les acides concentrés. Par exemple, l'acide sulfurique concentré et l'acide nitrique concentré très chauds dissolvent ou détruisent les fibres de polyester.

Sous l'action d'une solution alcaline concentrée et très chaude, la fibre de polyester subit une hydrolyse superficielle.

Le polyester a une résistance excellente aux agents oxydants tels que les agents blanchissants conventionnels pour le textile, et résiste aussi bien aux solvants habituels de nettoyage et de dégraissage (hydrocarbonés et chlorés) et aux tensioactifs. De même, il est insoluble dans la plupart des solvants organiques.

Les oligomères

Lors de la préparation des polymères destinés à la fabrication des fibres synthétiques, des substances de faible poids moléculaire et d'une très faible solubilité dans l'eau appelées oligomères peuvent se former. Ces oligomères restent englobés dans le polymère et se retrouvent après filature dans la fibre synthétique (représentent 1 à 3 % de la masse de la fibre). Elles ont tendance à migrer vers la surface de la fibre pendant la teinture, ce qui induit un effet négatif sur l'unisson et les solidités au frottement.

Microfibre de polyester

Les fibres de polyester peuvent être classées en fonction de leur titre (Tableau A-4). Généralement, le terme microfibre se rapporte aux fibres, ou filaments individuels dont le titre est inférieur à 1 décitex (1 gramme pour 10 000 mètres). Lorsque ce titre est inférieur à 0,3 dtex, ces microfibrilles sont appelées super microfibrilles, ou ultra super microfibrilles.

Titre (dtex)	Classification
7,0	Grosse fibre
7,0-2,4	Fibre fine
2,4-1,0	Fibre très fine
1,0-0,3	Microfibre
0,3-0,1	Super microfibre
<0,1	Ultra super microfibre

Tableau A- 4 : Classification des fibres de polyester

Actuellement, les microfibrilles sont largement utilisées dans le secteur confection/habillement, soit seules ou soit mélangées avec des fibres synthétiques ou naturelles afin d'améliorer les propriétés des tissus. Ces propriétés peuvent être mécaniques, thermiques ou liées au toucher et à l'apparence des matières. En fait, la finesse des microfibrilles se montre excellente pour produire des étoffes de poids léger et des draperies fluides et soyeuses. De même, leur meilleure imperméabilité à l'eau et leur faible perméabilité à l'air rendent les étoffes en microfibrilles bien adaptés pour les imperméables et vêtements de sport. De plus, les tissus à base de microfibrilles présentent, en général, d'excellentes propriétés de confort et d'esthétique.

Annexe B: La viscose

La viscose est une fibre artificielle obtenue par transformation de la cellulose des végétaux. Le procédé de fabrication est inventé en 1884 par le Français Hilaire de Chardonnet, puis, il a été breveté en 1892 au Royaume Uni par Cross, Bevan et Beadle. C'est donc une nouveauté âgée de plus de cent ans. La définition internationale précise que la viscose est une fibre manufacturée composée de cellulose régénérée dans laquelle les substituants ont remplacés au plus 15 % des groupes hydrogène et hydroxyle.

Cette fibre artificielle appelée encore « soie artificielle » a été créée pour répondre à la demande de tissus semblables à la soie, mais plus économiques. Elle a connu un développement important jusque vers 1950. Ensuite, elle est concurrencée par les textiles synthétiques.

La viscose présente en particulier des propriétés proches du coton : peu élastique, se froisse vite mais d'un bon pouvoir absorbant. Elle constitue une alternative très valable par rapport à ce dernier et joue un rôle extrêmement important dans le marché textile, spécialement dans les domaines tel que l'habillement à la mode, la literie, les essuies-main et la lingerie. En effet, les fibres artificielles permettent de produire des textiles à moindre coût, qui présentent un aspect et des propriétés proches des fibres naturelles. A titre d'exemple, les fibres de viscose ont de meilleures caractéristiques antibactériennes comparées aux fibres de polyamide, polyester, polypropylène et coton. Ces fibres sont le plus souvent mélangées avec le coton, la laine et la fibre polyester dans la production de tissus et de tricots pour les sous-vêtements, les manteaux et les robes.

Fabrication de la viscose

La matière première de base est de la cellulose issue de la pâte de bois ou de linters de coton (fibres trop courtes pour être filées). Cette matière première est mélangée à de la soude caustique par agitation mécanique : on obtient de l'alcali-cellulose. La pâte est ensuite malaxée avec du sulfure de carbone pour former un xanthate de cellulose qui est ensuite dissous dans la soude caustique diluée. A ce stade, on obtient une solution visqueuse nommée viscose. Par addition de disulfure de carbone, elle est rendue plus fluide, puis elle est dégazée et filtrée. Après filtration, on procède à l'opération de filage en passant la matière à travers une plaque perforée de petits trous. La coagulation se fait dans

un bain contenant de l'acide sulfurique, des sulfates de sodium et de zinc. Les filaments sont ensuite étirés, rincés, frisés, enzymés (on dépose sur les fibres un corps gras facilitant ensuite la filature) avant d'être bobinés en filaments ou transformés en fibres de longueur spécifique.

On appelle viscose les fils et les fibres textiles de cellulose obtenus par le procédé viscose. Ils peuvent aussi être désignés par les termes Rayonne (pour les fils continus) ou Fibranne (pour les fibres discontinues). Avec des traitements adaptés, la viscose peut également produire de films (cellophane), ou d'éponges dites végétales.

Propriétés de viscose

Propriétés physiques, mécaniques et thermiques

La viscose est une matière belle à regarder: elle a un aspect soyeux et lustré. Cette fibre se comporte de la même façon que les fibres naturelles cellulosiques. Elle se distingue par un très beau tomber grâce à la densité de la matière (supérieure au coton). Son toucher est fluide et naturel pour un confort optimal. Ne retient pas l'électricité statique. Elle possède une bonne résistance à l'usure par abrasion et à la lumière. Elle résiste à la chaleur sans jaunissement ni dégradation jusqu'à une température d'environ 125°C. Au-delà de cette température, l'effet de jaunissement est lié à la durée de chauffage et à l'atmosphère environnante. Sa vitesse d'absorption de l'humidité du corps est supérieure au coton (13 % contre 8,5 %). Cependant, elle a une résistance mécanique inférieure à celle du coton, une perte de résistance au mouillé et une forte tendance au retrait. Le Tableau B-1 illustre les propriétés dynamométriques des fibres et fils de viscose.

	Fibrannes		Rayonne	
	En conditions normales	A l'état mouillé	En conditions normales	A l'état mouillé
Ténacité (g/tex)	18 à 30	10 à 20	15 à 20	6 à 10
Allongement de rupture	18 à 35	20 à 40	17 à 30	20 à 40

Tableau B- 1 : Propriétés dynamométriques des fibres et fils de viscose

En outre, la fibre de viscose ne se feutre pas et elle est facile à entretenir et à teindre. Elle présente une conductibilité thermique moyenne. De plus, elle peut être

fabriquée mate ou brillante: le lustre peut être atténué par l'addition de produits délustrant comme les pigments à base d'oxyde de titane, lors de l'extrusion des fibres. En variant le brillant, la finesse et la texturation, il est possible de lui conférer un aspect soie, coton ou laine. On peut même imiter sans problème la densité typique du lin.

Propriétés chimiques

La viscose est sensible aux acides forts qui la détruisent rapidement. Les acides faibles ont aussi une action destructrice mais limitée.

Les bases fortes provoquent le gonflement de la viscose et sa rapide détérioration. De même, les bases faibles et les solutions alcalines provoquent le gonflement mais avec très peu d'altération.

La viscose est très sensible aux agents oxydants et réducteurs à forte concentration qui provoquent une dégradation de la fibre. A faible concentration, ces produits attaquent surtout la coloration. En revanche, les solvants hydrocarbonés, chlorés et oxygénés n'ont aucune action néfaste sur la viscose.

La teinture de cette fibre n'exige pas de conditions particulières. Les classes de colorants sont celles utilisées pour la teinture du coton, mais on peut très facilement obtenir des barrures. De même, les propriétés tinctoriales sont très voisines de celles du coton puisque la composition chimique des deux matières est similaire.

Annexe C: Angle de contact

Introduction

La mesure de l'angle de contact rend compte de l'aptitude d'un liquide à s'étaler sur une surface par mouillabilité. La méthode la plus simple et la moins coûteuse à mettre en œuvre consiste à mesurer l'angle de la tangente du profil d'une goutte déposée sur le substrat, avec la surface de substrat. Cette méthode permet d'obtenir des informations sur les transformations physiques et chimiques des premières couches atomiques de la surface, soit sur des épaisseurs de quelques angströms. Bien que les résultats dépendent de nombreux paramètres, une analyse simple des résultats est possible et permet d'accéder aux énergies de surface de nombreux matériaux.

Principe

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 (θ). Cet angle dépend de trois tensions interfaciales solide-liquide, solide-vapeur et liquide-vapeur représentées respectivement par γ_{SL} , γ_{SV} , γ_{LV} sur la Figure C-1.

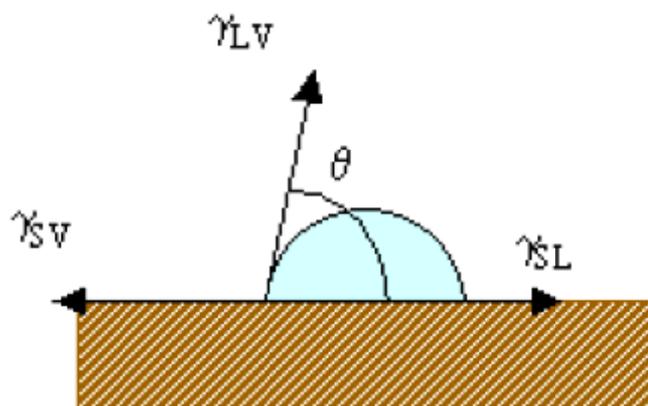


Figure C- 1: Forces appliquées sur une goutte d'eau déposée sur un support solide

Ces forces s'appliquent en particulier sur la ligne de contact (point d'arrêt des interfaces) et leur équilibre mécanique, exprimé suivant la direction du plan solide, conduit à la relation de Young :

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos\theta \quad (\text{C-1})$$

Cette relation définit un angle de contact unique pour un système liquide-solide-vapeur donné, le solide étant supposé lisse, homogène et indéformable. Or en pratique, on observe toute une plage d'angles, entre deux valeurs extrêmes appelées angles de reculée et d'avancée: les angles d'avancée sont observés expérimentalement après un processus de progression de liquide sur le solide et sont toujours supérieurs aux angles de recul lors d'un retrait de liquide. On appelle hystérésis de l'angle de contact ce phénomène, dû aux inévitables imperfections de la surface solide qui permettent l'accrochage de l'angle de contact.

L'angle ainsi mesuré nous donne trois types d'information:

- Si on utilise l'eau distillée comme liquide de mesure d'angle de contact, on peut déduire le caractère hydrophile ou hydrophobe de la surface: une valeur faible de l'angle de contact indique une surface « mouillable » tandis qu'une grande valeur indiquera un matériau « peu mouillable ». Ainsi, plus l'angle de contact est élevé, plus la surface est hydrophobe (Figure C-2).
- Si on utilise plusieurs liquides de référence différents, on peut accéder à l'énergie libre de la surface, tout en discriminant les composantes polaires ou apolaires en utilisant le modèle d'Owens et Wendt ou celui de Good et Van Oss.
- Si on mesure l'hystérésis entre l'angle à l'avancée de la goutte et au retrait de la goutte, on obtient des renseignements sur la non homogénéité physique (rugosité) ou chimique de la surface.

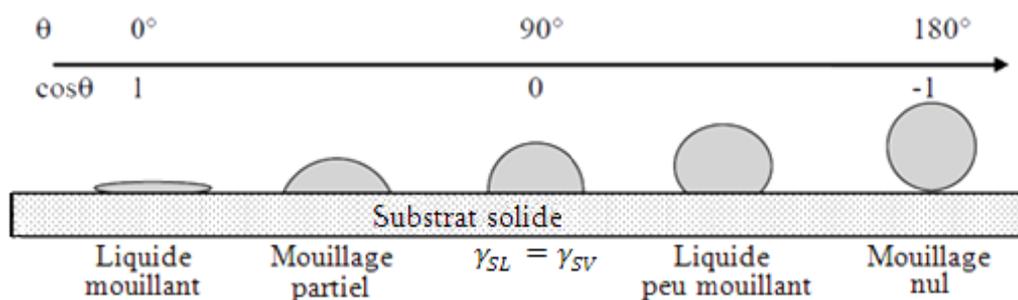


Figure C- 2 : Angle de contact d'un liquide avec un solide. Pour $\theta < 90^\circ$ le liquide mouille la paroi, pour $\theta > 90^\circ$, le liquide ne mouille pas la surface. Si $\theta = 0^\circ$, la mouillabilité de liquide pour cette surface est totale

Cette méthode possède des limitations. L'angle de contact doit être mesuré sur des surfaces solides, lisses et homogènes. Donc, la méthode ne s'applique pas aux surfaces trop rugueuses comme par exemple les étoffes textiles.

Calcul de l'énergie de surface

L'équation de Young (Equation C-1) met en relation l'angle de contact d'un point triple aux énergies de surface de trois interfaces (solide-liquide γ_{SL} , solide-vapeur γ_{SV} et liquide-vapeur γ_{LV}).

L'étude d'une surface par les angles de contact consiste alors à trouver l'énergie de surface de solide γ_{SV} ou de ses composantes à partir de mesures de l'angle de contact de différents liquides dont l'énergie de surface γ_{SL} ou ses composantes sont connues.

L'énergie de l'interaction de surface solide-liquide γ_{SL} n'est en général pas connue. De ce fait, plusieurs modèles d'interaction ont été développés pour déterminer les paramètres inconnus. Parmi ces modèles on peut citer les deux suivants :

Modèle d'Owens et Wendt

Dans ce modèle, les énergies de surface des liquides et du solide ont été séparées en deux composantes, l'une dite dispersive γ_S^d et l'autre polaire γ_S^p , avec respectivement pour la phase liquide et solide une énergie de surface totale (Equations A-2 et A-3):

$$\gamma_L = \gamma_L^d + \gamma_L^p \quad (C-2)$$

$$\gamma_S = \gamma_S^d + \gamma_S^p \quad (C-3)$$

L'équation reliant les composantes à l'angle de contact s'écrit alors :

$$\gamma_L(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_L^d \gamma_S^d} + 2\sqrt{\gamma_L^p \gamma_S^p} \quad (C-4)$$

Les inconnues sont les composantes polaire et dispersive de la phase solide. Elles sont calculées à partir de mesures d'angle de contact réalisées à l'aide d'au moins deux liquides dont les composantes polaires et dispersives sont connues.

Modèle de Good et Van Oss

Dans ce modèle, l'énergie de surface est donnée comme suit :

$$\gamma_S = \gamma_S^d + 2\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} \quad (C-5)$$

où γ_S^d est la composante dispersive et γ_S^+ et γ_S^- les composantes polaires.

La relation entre les composantes de l'énergie de surface du solide, celles du liquide et l'angle de contact de la goutte s'écrit comme suit :

$$\gamma_L(1 + \cos\theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_S^-} \right) \quad (\text{C-6})$$

En utilisant trois liquides différents dont les composantes dispersives et polaires sont connues, on peut obtenir l'énergie de surface du solide.

Le modèle à deux composantes d'Owens et Wendt est classiquement utilisé pour le calcul d'énergie de surface afin d'évaluer les propriétés d'adhésion entre les solides ou entre un solide et un liquide. L'emploi de modèle de Good et Van Oss devient plus judicieux, lorsque la prédiction du comportement du système nécessite la caractérisation des interactions acide/base (miscibilité, comportement d'une molécule dans un milieu aqueux).

Annexe D: Historique des réseaux de neurones

Les recherches dans le domaine du connexionnisme ont démarré avec la présentation en 1943 par W. McCulloch et W. Pitts d'un modèle simplifié de neurone biologique communément appelé neurone formel. Ces deux neurobiologistes sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes.

En 1949, D. Hebb introduit dans son livre intitulé «The Organization of Behavior » la notion d'apprentissage. Il propose une règle simple permettant de modifier la valeur des coefficients synaptiques en fonction de l'activité des unités qu'ils relient. Cette règle est à la base de la plupart des méthodes d'apprentissage, supervisées ou non.

En 1957, F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. Il construit le premier neuro-ordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance de formes et au calcul de certaines fonctions logiques.

En 1960, B. Widrow, développe le modèle Adaline (Adaptative Linear Element). Structurellement, ce modèle ressemble au Perceptron mais a une loi d'apprentissage différente. Celle-ci est à l'origine de l'algorithme de rétro-propagation de gradient très utilisé aujourd'hui avec les Perceptrons multicouches.

En 1969, M. Minsky et S. Papert montrent dans leur livre intitulé « Perceptrons » les limites théoriques des réseaux de neurones de type perceptron, notamment l'impossibilité de traiter des problèmes non linéaires. Suite aux idées publiées dans ce livre, la plupart de chercheurs ont abandonné ce domaine avec une chute remarquable de fonds investis.

En 1982, J. J. Hopfield développe un modèle qui utilise des réseaux totalement connectés basés sur la règle de Hebb pour définir les notions d'attracteurs et de mémoire associative. Il donne ainsi un nouveau souffle à ce domaine. Le neuronal redevient donc un sujet d'études acceptable et les recherches sur ce sujet reprennent, bien que le problème du perceptron sur son incapacité à traiter les problèmes non linéaires n'ait pas été résolu.

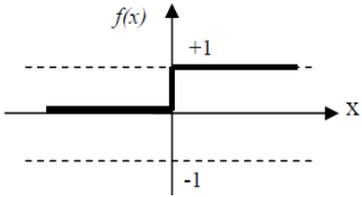
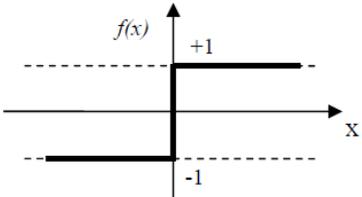
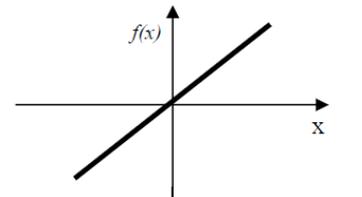
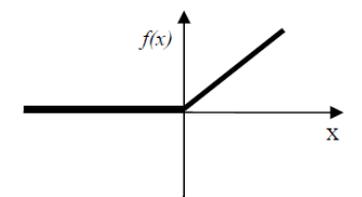
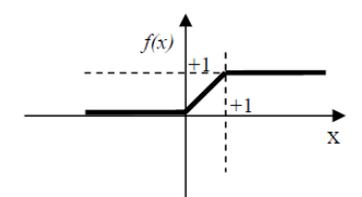
En 1983, c'est la Machine de Boltzmann qui fut le premier modèle connu apte à traiter de manière satisfaisante les limitations recensées dans le cas du perceptron, mais l'utilisation pratique s'avère difficile et le temps de calcul est long.

Et c'est en 1986 que la révolution survient dans le domaine des réseaux de neurones artificiels. Proposé par la première fois par Werbos, le Perceptron multicouche apparaît en 1986 introduit par Rummelhart, et, simultanément, sous une appellation voisine chez Le Cun (1985). Le grand progrès de cette invention est qu'il ne possède pas les défauts qui avaient été mis en évidence en 1969. Ces systèmes reposent sur la rétro-propagation du gradient de l'erreur : c'est un algorithme d'apprentissage qui permet d'optimiser les paramètres d'un réseau de neurones à plusieurs couches. Depuis ce temps, la recherche sur les réseaux de neurones connaît un essor considérable.

De nos jours, l'utilisation des réseaux de neurones dans divers domaines ne cesse de croître. Les applications en sont multiples et variées.

Annexe E : Les fonctions d'activation

Dans un réseau de neurone, chaque neurone possède sa propre fonction d'activation (ou fonction de transfert) qui lui permet de calculer sa sortie (ou son état) à partir du produit scalaire des entrées et des poids associés. C'est cette valeur qui sera transmise aux neurones avals. Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction d'activation. Les plus courantes sont représentées sur le Tableau E-1. L'utilisation de fonctions d'activation non linéaires permet l'obtention de modèle statistique non linéaire.

Catégorie	Type	Equation	Allure
Seuil	Binaire (fonction de Heaviside)	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
	Signe	$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ -1 & \text{si } x \leq 0 \end{cases}$	
Linéaire	Identité	$f(x) = x$	
	Linéaire positif	$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
	Saturé positif	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \\ x & \text{si non} \end{cases}$	

	Saturée symétrique	$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x \leq -1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \\ x & \text{si non} \end{cases}$	
Non linéaire	Logistique (sigmoïde)	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
	Tan-sigmoïde (tanh)	$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1$	

Tableau E- 1 : Différents types de fonctions d'activation

RESUME en français : La technique par plasma atmosphérique semble efficace pour la modification des surfaces de matériaux textiles car le traitement est rapide, peu onéreux et écologiquement propre. En dépit de ces avantages, il est extrêmement difficile de comprendre la relation complexe non-linéaire entre les paramètres du procédé plasma et les propriétés finales des matériaux. L'étude et l'optimisation d'un tel procédé doivent être donc basées sur une exploitation des techniques intelligentes telles que la logique floue et les réseaux de neurones.

Dans une première partie, l'impact de traitement par plasma de type Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) sous air est étudié sur différents types de tissus en polyester et viscose. Afin de mieux comprendre l'effet de la structure textile sur les résultats du traitement, une sélection des paramètres les plus pertinents a été effectuée en utilisant un critère de sensibilité basé sur la logique floue. Il a été mis en évidence que la puissance électrique, la vitesse de traitement, la matière, la finesse des fibres, la perméabilité à l'air, l'armure et la densité des pics ont une influence sur la mouillabilité et la capillarité des tissus.

Dans la dernière partie de cette étude, une approche utilisant les réseaux de neurones a été développée afin de prédire la relation entre les paramètres pertinents sélectionnés et les propriétés hydrophiles des tissus. Des résultats tout à fait satisfaisants ont été obtenus et montrent une bonne capacité de généralisation. En outre, une analyse quantitative par poids des connexions a été menée pour analyser l'importance relative des paramètres d'entrée. Les résultats de cette analyse sont cohérents avec ceux obtenus en utilisant le critère de sensibilité flou. Ceci permet donc de confirmer d'une part l'influence des paramètres sélectionnés, et d'autre part de montrer la fiabilité des réseaux neuronaux.

TITRE en anglais: Modeling the relationship between the plasma process parameters and the quality features of textile material by learning of experimental data

RESUME en anglais: Atmospheric plasma treatment seems to be a good way to treat quickly, cheaply and ecologically textile material surfaces. Despite these advantages, it is extremely difficult to understand the complex non-linear relationship between the plasma processing parameters and the final properties of materials. Therefore, the study and optimization of such process must be based on an exploitation of intelligent techniques such as fuzzy logic and neural networks.

In a first part, the impact of atmospheric air Dielectric Barrier Discharge (DBD) plasma treatment is studied on different types of polyester and viscose woven fabrics. In order to get a better understanding on how the structure of woven fabrics influence on the results of the plasma treatment, a selection of the most relevant parameters was carried out by using a fuzzy logic based sensitivity variation criterion. This work shows that that the electric power, the treatment speed, the composition, the fibers fineness, the air permeability, the weave construction and the summit density have an influence on the wettability and the capillarity of fabrics.

Lastly, a neural network approach was developed to predict the relationship between the selected input parameters and the fabric hydrophilic properties. Very satisfactory results were obtained and show a good capacity of generalization. Moreover, a quantitative analysis based on the weights of connections was conducted to analyze the relative importance of the input parameters. The results of this analysis are coherent with those obtained by using the fuzzy logic based sensitivity variation criterion. Thus, this finding confirms, on the one hand, the influence of the selected parameters and, on the other hand, it shows the efficiency of neural networks.

DISCIPLINE : Doctorat d'automatique, génie informatique, traitement du signal et des images.

MOTS-CLES : Plasma atmosphérique (*atmospheric plasma*), tissus (*wovens*), mouillabilité (*wettability*), capillarité (*capillarity*), sélection de variables (*feature selection*), modélisation (*modeling*), réseaux de neurones (*neural networks*).

Université des sciences et technologie de Lille (USTL)
Laboratoire GEMTEX de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT) 2,
allée Louise et Victor Champier BP30329. 59056 Roubaix.
