

Habilitation à Diriger des Recherches

École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur de l'Université de Lille

Systèmes e-textiles composés de structures textiles et de sous-systèmes électroniques intégrés - interactions homme-machine

Xuyuan TAO

Discipline : Génie informatique, automatique et traitement du signal

Unité de Recherche : GEMTEX

Établissement de soutenance : Université de Lille

Présentée le 12/07/2021 devant le jury composé de :

Prof. René ROSSI	ETH Zurich, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Suisse	Rapporteur
Prof. Lieva VAN LANGENHOVE	Université de Gand, Belgique	Rapporteuse
Prof. Dominique ADOLPHE	Université de Haute-Alsace	Rapporteur
Prof. Mireille BAYART	Université de Lille	Présidente
Prof. Vladan KONCAR	ENSAIT	Garant

Remerciements

Je remercie en premier lieu Prof. Vladan KONCAR avec qui je travaille depuis ma thèse de Doctorat. Il m'a toujours supporté et j'ai pu développer avec son aide mes sujets de recherche. Ses conseils sont toujours précieux et avisés.

J'adresse mes remerciements aux rapporteurs, René ROSSI, Lieva VAN LANGENHOVE, Dominique ADOLPHE et à l'examinatrice Mireille BAYART, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mes remerciements vont aux Post-Doctorants, Ezgi ISMAR, Amarish DUBEY et aux Doctorants Xiao CHEN, Constance MORETTI, Kaixuan LIU, Amale ANKHILI, Kaichen WANG, Shahood UZ ZAMAN, Mengyun ZHANG, Pengpeng CHEN, que j'ai pu encadrer ou co-encadrer pour leurs travaux de recherche et les résultats obtenus. Sans leurs contributions, cette habilitation ne serait pas possible.

Je tiens à remercier mes collègues de l'ENSAIT et du GEMTEX, Enseignants, Enseignants-Chercheurs, ingénieurs, techniciens, ouvriers et personnels administratifs pour leur investissement ou appui. J'ai une pensée particulière pour Prof. Xianyi ZENG et Prof. Pascal BRUNIAUX qui m'ont supporté le plus au quotidien. Mes remerciements vont également, entre autres, à François DASSONVILLE, Ludovic KOEHL, Sébastien THOMASSEY, Cédric COCHRANE, Aurélie CAYLA, Guillaume TARTARE, Nathalie DOUMENG, Marie-Pierre DELESPIERRE, Élise TERNYNCK avec qui j'ai toujours plaisir à échanger.

Je n'oublie pas les partenaires industriels et académiques avec qui j'ai pu travailler, en particulier : Jianping WANG (Donghua University), Ludovic BURGNIÉS (IEMN), Gaby CAPTUR (London's Global University), Debbie FALCON (Royal Free London NHS Foundation Trust), Tzu-Hao HUANG (TTRI), Gwo-Tsuen JOU (TTRI), Selin Hanife ERYURUK (Istanbul Technical University), Fatma KALAOGLU (Istanbul Technical University), Savvas VASSILIADIS (University of West Attica), Henry Yi LI (University of Manchester) et bien d'autres.

En plus des personnes citées ci-dessus, mon parcours a été ponctué de belles rencontres faites dans les laboratoires, entreprises, conférences, qui m'ont donné et qui me donnent toujours envie de faire ce métier. A l'heure de ce bilan, j'ai une pensée pour ces rencontres enrichissantes.

Pour finir, je souhaite remercier tous mes proches, mes parents et mes amis pour leur soutien moral et leurs encouragements. Je donne une mention particulière à ma femme et mon fils pour leur soutien et leur patience.

Sommaire

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	5
LISTE DES FIGURES.....	7
LISTE DES TABLEAUX	13
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	15
INTRODUCTION.....	17
PREMIERE PARTIE – PRESENTATION SYNTHETIQUE DES ACTIVITES DE RECHERCHE, D’ENSEIGNEMENT ET ADMINISTRATIVES	19
1 CURRICULUM VITAE	19
2 RECAPITULATIFS DES ACTIVITES PEDAGOGIQUES ET DE RECHERCHES.....	21
3 SYNTHESE DES ACTIVITES DE RECHERCHE	22
3.1 RESUME DE MES THEMATIQUES DE RECHERCHES	22
3.2 ENCADREMENTS DE THESES ET DE POST-DOCS.....	26
3.3 COLLABORATIONS ET CONTRATS DE RECHERCHE	28
3.4 PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS ET RAYONNEMENT	29
4 SYNTHESE DES ACTIVITES PEDAGOGIQUES ET ENCADREMENT D’ETUDIANTS	37
4.1 RESUME DES ENSEIGNEMENTS	37
4.2 FORMATION CONTINUE	41
4.3 ENCADREMENT PEDAGOGIQUE D’ETUDIANTS	41
5 SYNTHESE DES ACTIVITES ADMINISTRATIVES ET COLLECTIVES.....	43
5.1 PARTICIPATION AUX INSTANCES	43
5.2 PARTICIPATION AUX ACTIVITES DE L’ECOLE	44
DEUXIEME PARTIE – TRAVAUX SUR LES TEXTILES ELECTRONIQUES.....	45
1 INTRODUCTION.....	45
2 TRANSISTORS FIBREUX.....	45
2.1 INTRODUCTION.....	45
2.2 TRAVAUX SUR LES TRANSISTORS FIBREUX ORGANIQUES A EFFET DE CHAMP	46
2.3 TRAVAUX SUR DES TRANSISTORS FIBREUX ORGANIQUES ELECTROCHIMIQUES	47
2.4 TRAVAUX SUR LES CIRCUITS ELECTRONIQUES.....	48
3 TEXTILES ELECTROCHROMES POUR LES CELLULES D’AFFICHEUR TEXTILE	50
3.1 INTRODUCTION.....	50
3.2 CELLULES ELECTROCHROMES A BASE DE TISSU ENDUIT PAR LE PEDOT:PSS	51
3.3 CELLULES ELECTROCHROMES A BASE DE FIL ENDUIT PAR LE PEDOT:PSS	54
3.4 ÉTUDE DE VIEILLESSEMENT DE CELLULES ELECTROCHROMES	56
4 ÉLECTRODES ECG TEXTILES	62
4.1 INTRODUCTION.....	62
4.2 ÉLECTRODES ECG A BASE DE L’ETOFFE ENDUIT PAR LE PEDOT:PSS.....	63
4.3 ÉLECTRODES ECG A BASE DES TRICOTS CONDUCTEURS COMMERCIAUX	65
4.4 ÉLECTRODES ECG A BASE DES FILS CONDUCTEURS	66
5 ANTENNES TEXTILES	68

6	CONCLUSION.....	72
TROISIEME PARTIE – TRAVAUX SUR LES INTEGRATIONS DES ELECTRONIQUES DANS LA STRUCTURE TEXTILE 73		
1	INTRODUCTION.....	73
2	LES CIRCUITS RIGIDES INTEGRES DANS LA STRUCTURE TEXTILE	74
2.1	CONNECTION PAR BORNIER DE CONNEXION	74
2.2	CONNECTION PAR SOUDURE ET BRODERIE	75
3	LES CIRCUITS SOUPLES INTEGRES DANS LA STRUCTURE TEXTILE	76
3.1	CONNEXION PAR ADHESION AVEC LE FILM CONDUCTEUR	76
3.2	CONNECTION PAR BRODERIE OU COUTURE AVEC UN CIRCUIT FLEXIBLE.....	78
3.3	CONNECTION PAR SOUDURE.....	83
4	CONCLUSION.....	87
QUATRIEME PARTIE – TRAVAUX SUR LA FIABILISATION, LA DURABILITE ET LA LAVABILITE DES SYSTEMES TEXTILES INTELLIGENTS		
89		
1	INTRODUCTION.....	89
2	LAVAGES DES FILS CONDUCTEURS.....	89
2.1	PROTECTION PAR TPU.....	89
2.2	PROTECTION PAR BRODERIE	93
3	LAVAGE DES SYSTEMES TEXTILES INTELLIGENTS	97
4	ANALYSE DES IMPACTS PENDANT LE LAVAGE	98
4.1	IMPACTS DE L’EAU ET DU DETERGENT	99
4.2	IMPACT DES MOUVEMENTS MECANIQUES	101
5	CONCLUSION.....	112
CINQUIEME PARTIE – TRAVAUX SUR LA CONCEPTION ORIENTEE VERS LES INTERACTIONS HOMME-MACHINE POUR LES PLATEFORMES NUMERIQUES DE CO-CREATION DE VETEMENTS.....		
115		
1	INTRODUCTION.....	115
2	DEVELOPPEMENT D’UNE PLATEFORME « CO-CREATION » EN CONTROLANT ET OPTIMISANT LA PERCEPTION HUMAINE SUR LES VETEMENTS VIRTUELS.....	115
2.1	CREATION D’UN VETEMENT VIRTUEL PAR LES LOGICIELS DE CAO.....	116
2.2	ACQUISITION DES PARAMETRES TECHNIQUES DES ETOFFES DANS LE LOGICIEL DE CAO PAR DES TESTS SENSORIELS.....	119
2.3	MODELISATION DE LA RELATION ENTRE LES PARAMETRES TECHNIQUES DU TEXTILE ET LA PERCEPTION VIRTUELLE DU MATERIAU	121
2.4	MODELISATION DE LA RELATION ENTRE LES PARAMETRES DES PATRONS ET LA PERCEPTION DU FIT D’UN VETEMENT VIRTUEL	124
3	TECHNIQUE DE CREATION POUR LES STYLISTES ET MODELISTES.....	130
3.1	TECHNIQUE DE DESIGN POUR LE DESSIN DE STYLISTE ET LE PATRONAGE EN 2D	131
3.2	TECHNIQUE INTERACTIVE DE PATRONAGE DANS UN LOGICIEL CAO EN 3D	135
4	MODELISATION D’EVALUATION DE FIT A LA BASE DE MACHINE LEARNING	136
5	CONCLUSION.....	138
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		139
BIBLIOGRAPHIE		141

Liste des figures

Figure 1 : (a) Configuration du transistor fibreux et image MEB de fil inox métallisé avec le revêtement de pentacène. (b) Caractéristiques des sorties d'un transistor organique fibreux de pentacène. (c) Caractéristique de transfert d'un transistor organique fibreux.	46
Figure 2 : (a) Caractéristiques de sorties d'un transistor fibreux de P3HT RR. (b) Caractéristiques de transfert d'un transistor fibreux de P3HT RR.	47
Figure 3 : (a) Photo de transistor fibreux organique électrochimique forme « croisée ». (b) Photo de transistor fibreux organique électrochimique forme « ligne parallèle ».	47
Figure 4 : (a) Caractéristiques de sortie et de transfert d'un transistor organique fibreux électrochimique forme « croisée ». (b) Caractéristiques de sortie et de transfert d'un transistor fibreux organique électrochimique forme « ligne parallèle ».	48
Figure 5 : a) Inverseur réalisé par un transistor fibreux forme « croisée ». (b) Inverseur réalisé par un transistor fibreux forme « ligne parallèle ». (c) Circuit « NON-OU » réalisé par deux transistors fibreux forme « croisée » (d) Circuit « NON-OU » réalisé par deux transistors fibreux forme « ligne parallèle ».	49
Figure 6 : (a) Courbe de sortie d'un inverseur. (b) Courbe de sortie d'un circuit d'inverseur à l'excitation d'un pulse pendant 17 heures. (c) Courbe de sortie d'un circuit « NON-OU » à l'excitation de deux pulses. (d) Caractéristique d'un circuit électrique d'amplificateur.	49
Figure 7 : Structure traditionnelle d'une cellule électrochrome.	50
Figure 8 : (a) Structure électrochrome à base textile formée de cinq couches. (b) Prototypes de T-shirt communicant comprenant un afficheur électrochrome.	51
Figure 9 : Structure électrochrome à base de trois couches.	52
Figure 10 : (a) Échantillon d'une structure électrochrome à base de trois couches. (b) Flexibilité de la structure électrochrome. (c) Échantillon d'une structure électrochrome cousue.	53
Figure 11 : (a) Exemple de réalisation des configurations avec un afficheur à quatre pixels triangulaires. (b) Chiffres obtenus de 0 à 9 sur un afficheur sept segments réalisé avec une structure électrochrome à base de trois couches.	54
Figure 12 : Ligne d'enduction continue. (a) Le procédé d'enduction. (b) Bobine de fil nul (c) Première phase d'enduction (d) Deuxième phase d'enduction (e) Four tubulaire sur 2 mètres à la température de 180°C.	54
Figure 13 : (a) Structure de cellule électrochrome à base de trois couches. (b) État réduit (c) État oxydé.	55
Figure 14 : Résultat de test de voltamètre cyclique. (a) Opération de voltamètre cyclique de -2V à 2V avec la vitesse de balayage de 10mV/sec à 500 MV/sec. (b) Analyse de voltamètre cyclique à la vitesse de balayage 50mV/sec. (c) Analyse de stabilité pour 2500 cycles d'analyse à la vitesse de balayage de 50mV. (d) Étude de stabilité traçant le pourcentage de rétention de capacité spécifique sur le nombre de cycles.	55
Figure 15 : (a) Photo de l'appareil d'essai de pliage hydraulique. (b) Résultat des cellules électrochromes testées par la première méthode. (c) Résultat des cellules électrochromes testées par la deuxième méthode.	56
Figure 16 : Photo du système de mesure de couleur utilisant une caméra.	58

Figure 17 : Durées de vie moyennes et écarts-types des structures électrochromes testées, classées par ordre décroissant. (a) en nombre de cycles (b) en temps.	59
Figure 18 : Évolution de l'écart de couleur ΔE entre les états oxydé et réduit, en fonction du temps. 60	
Figure 19 : (a) Image colorée d'une structure électrochrome dans son dernier cycle de mesure. (b) La même image en niveaux de gris. (c) La même image binarisée en noir et blanc.....	61
Figure 20 : Résultat de l'étude de l'homogénéisation. (a) par méthode par seuillage. (b) par méthode par comptage de pixels actifs.....	62
Figure 21 : Évolution de la résistivité surfacique des tricots de différentes natures imprégnés de PEDOT:PSS en fonction du nombre de lavages subis.....	64
Figure 22 : Signaux ECG mesurés par les électrodes à base des tricots enduits par le PEDOT:PSS (a) en coton avant lavage (b) en coton après lavage (c) en polyamide avant lavage (d) en polyamide après lavage (e) en polyester avant lavage (f) en polyester après lavage.	64
Figure 23 : Évolution de la résistance par carré de quatre tricots en fonction du nombre de lavages subis.	65
Figure 24 : Signaux ECG mesurés par les électrodes à base des tricots commerciaux. (a) avant lavage (b) après lavage.	66
Figure 25 : (a) Allure d'une électrode bordée. (b) Prototype de bandeau avec trois électrodes brodées.	66
Figure 26 : Signaux ECG obtenus par les bandeaux bordés. (a) Shieldex avant lavage. (b) Shieldex après lavage. (c) Madeira avant lavage. (d) Madeira après lavage.....	67
Figure 27 : Prototype de vêtement ECGi. (a) Forme d'électrode. (b) Configuration de bouton pression. (c) Configuration des électrodes sur le vêtement. (d) Photo de porteur pendant la caractérisation des signaux d'ECG.....	68
Figure 28 : (a) Photos des antennes textiles brodées. (b) Résultat de caractérisation de l'antenne brodée textile.....	69
Figure 29 : Photos des antennes métamatériaux. (a) Forme « carrée » (b) Forme « demi-cercle » (c) Simple Boucle. (d) Double boucle (e) Forme « H ».	70
Figure 30 : (a) Design de l'antenne Yagi-Uda avec SRR. (b) Photo de l'antenne. (c) Photo de tissu avec le filament en cuivre inséré dans le tissu.	71
Figure 31 : (a) T-shirt communicant équipé d'un afficheur électrochrome à quatre pixels commandés indépendamment par un circuit imprimé cousu sur le T-shirt. (b) Photo du circuit électronique de commande d'un afficheur électrochrome à quatre pixels.....	74
Figure 32 : Photo de la connexion entre le PCB flexible et rigide.	75
Figure 33 : (a) Schéma de l'intégration des PCB flexible et rigide via les fils métaux. (b) Photo de prototype.	76
Figure 34 : Photo de prototype « T-shirt intelligent » (a) Piste conductrice en argent sur TPU. (b) PCB Flexible (FPCB). (c) Schéma de circuit de prototype. (d) Photo du prototype final (e) Logiciel de surveillance.	77
Figure 35 : Schéma de connexion entre le film TPU enduit par encre en argent et le PCB flexible.....	77
Figure 36 : Photo de l'écran textile. (a) LED collée sur le film TPU avec le film ACF. (b) LEDs actionnées. (c) Prototype final.	78
Figure 37 : Photos du PCB flexible. (a) Face avant. (b) Face arrière.....	79

Figure 38 : Schéma du circuit de prototype de T-shirt intelligent.....	79
Figure 39 : Photos de prototype T-shirt. (a) Vue inférieure. (b) Vue extérieure. (c) Prototype avec les électrodes réalisées par broderie.	80
Figure 40 : Procédure de mise en place du circuit et des électrodes textiles dans une structure textile. (a) Adhésion du film TPU sur le côté inférieur du support textile. (b) Adhésion du circuit électronique. (c) Mise en place des électrodes textiles. (d) Mise en place du fil conducteur entre les électrodes et le circuit. (e) Protection du fil conducteur par le film TPU. (f) Encapsulation du circuit par PDMS.....	81
Figure 41 : Interface de programme (a) Android et (b) Site web.....	82
Figure 42 : (a) L'évolution de la précision pendant la validation croisée. (b) Le modèle de l'arbre de décision.....	83
Figure 43 : (a) Module connecté aux électrodes brodés. (b) Pads connectés par broderie. (c) Mauvaise adhésion du PDMS à l'aluminium après un seul cycle de lavage.....	83
Figure 44 : Représentation schématique des fils assemblés.....	84
Figure 45 : Courbe de résultat de mesure sur le banc de traction.....	85
Figure 46 : Mesures de résistance linéique et régression linéaire pour le fil obtenu à partir du multifilament de cuivre (a) 12 x 30 μm et (b) 30 x 20 μm	86
Figure 47 : Performance de broderie. (a) fil ordinaire, (b) Madeira, (c) Shieldex, (d) Tibetch (dans la canette) (e) Fil A (f) Fil B. (Gauche) coté supérieure (Droite) côté inférieur.....	86
Figure 48 : (a) Broderie du logo "ensait" avec LED directement soudée. (b) Circuit brodé avec 16 LEDs et trois composants électroniques directement soudés.....	87
Figure 49 : (a) Presse à chaud. (b) Échantillon des fils conducteurs protégés par le film TPU.....	90
Figure 50 : Évolution de résistance électrique des fils conducteurs polymères enduits par argent. (a) De 0 à 10 cycles de lavage. (b) De 0-50 cycles de lavage.....	91
Figure 51 : Image de MEB pour les fils conducteurs sans protection TPU après le test de lavage. (a) Avant de lavage. (b) 5 cycles de lavage. (c) 10 cycles de lavage. (d) 20 cycles de lavage. (e) 40 cycles de lavage. (f) 50 cycles de lavage.....	91
Figure 52 : Évolution de la résistance électrique de multifilaments en cuivre nickelé.	92
Figure 53 : Images des multifilaments en cuivre nickelé (a) Avant lavage sans TPU. (b) 5 cycles de lavage sans TPU. (c) 20 cycles de lavage sans TPU. (d) 50 cycles de lavage sans TPU. (e) Avant lavage avec TPU. (f) 5 cycles de lavage avec TPU. (g) 20 cycles de lavage avec TPU. (h) 50 cycles de lavage avec TPU...	93
Figure 54 : Motifs de zigzag bordés (a) 2 zigzags (b) 3 zigzags (c) Double couche (1 zigzag + satin).....	94
Figure 55 : Pistes conductrices encapsulées. (a) 2 zigzags protégés par TPU. (b) Double couche protégée par TPU (c) 3 zigzags protégés par TPU. (d) 2 zigzags protégés par fil non-conducteur.	94
Figure 56 : Résultat de l'évolution des résistances du fil Shieldex selon le cycle de lavage. (a) Sans protection. (b) Évolution pour le motif 2 zigzags. (c) Évolution pour le motif 3 zigzags. (d) Évolution pour le motif double couche. Résultat de l'évolution des résistances du fil Madeira selon le cycle de lavage. (a) Sans protection. (b) Évolution pour le motif 2 zigzags. (c) Évolution pour le motif 3 zigzags. (d) Évolution pour le motif double couche.	95
Figure 57 : Image MEB (a) Fil Madeira avant lavage. (b) Fil Madeira après 50 lavages. (c) Fil Shieldex avant lavage. (d) Fil Shieldex après 50 lavages.	96
Figure 58 : Test de lavage des circuits rigides (prototype de test de TEIP) protégés par la silicone. (a) Avant lavage. (b) Prototype abîmé après lavage.	97

Figure 59 : Test de lavage des circuits flexibles (prototype de TTRI) protégés par la silicone. (a) Avant lavage. (b) Prototype abîmé après lavage.....	98
Figure 60 : (a) Prototype de TEIP protégé par la silicone. (b) Test du prototype de TEIP dans une chambre de climatisation avec un mannequin transpiratoire.	98
Figure 61 : (a) Structure chimique du polyamide. (b) FTIR-ATR résultats de fils conducteurs immergés dans le mélange de l'eau et du détergent. (c) FTIR-ATR résultats de fils conducteurs immergés dans le mélange de l'eau distillée.	100
Figure 62 : Spectrum d'absorbance des échantillons.....	100
Figure 63 : Images MEB pour les fils conducteurs (a) sans immergent (b) Immergés dans l'eau avec détergent (c) Immergés dans l'eau distillé.....	101
Figure 64 : Résistance électrique des fils conducteurs.	101
Figure 65 : Exemple des états de tambour pour un processus de lavage complet.....	102
Figure 66 : Durée totale et pourcentage des durées pour chaque état de tambour dans d'un processus complet de lavage.	103
Figure 67 : Photo du circuit électronique scellé par une enveloppe en plastique étanche.	103
Figure 68 : Résultat de mesure d'accéléromètre pendant l'étape de lavage.	104
Figure 69 : Résultat de la mesure d'accéléromètre pendant l'étape d'essorage (a) 400 RPM (b) 600 RPM.	105
Figure 70 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant l'étape de lavage. (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.	106
Figure 71 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant l'étape d'essorage (400 RPM) (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.....	107
Figure 72 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant l'étape d'essorage (600 RPM) (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.....	107
Figure 73 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant la rotation élevée (400 RPM) (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.....	108
Figure 74 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant la rotation élevée (600 RPM) (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.....	108
Figure 75 : (a) Échantillon de test Martindale. (b) Photo de l'échantillon monté sur la machine Martindale.	109
Figure 76 : Évolution des résistances des fils conducteurs sous la géométrie 3 zig-zags après le lavage et le test d'abrasion (a) Programme « soie ». (b) Programme « rapide » (c) Test d'abrasion (d) Comparaison des évolutions des résistances pour le fil A.	110
Figure 77 : (a) Photos de la machine de test de boulochage et des échantillons. (b) Comparaison des évolutions des résistances pour le fil A sous la géométrie 3 zig-zags après le lavage et le test de boulochage.....	111
Figure 78 : Échantillons des PCBs flexibles avec les LEDs soudées.	112
Figure 79 : Schéma général de la plateforme de co-création.	116
Figure 80 : Comparaison entre les prototypes réels (gauche) et virtuels (droite).	119
Figure 81 : (a) Différentes vues de l'étoffe réel sur le drapéomètre en scénario statique. (b) Déplacement du drapéomètre en scénario dynamique.	120

Figure 82 : Processus de la méthode proposée utilisant l'AASCS.	120
Figure 83 : Relation complexe entre les paramètres techniques et les descripteurs sensoriels.	123
Figure 84 : Comparaison des performances globales des 3 modèles.	123
Figure 85 : Exemple de co-création pour un vêtement de la collection de costumes de « cérémonie » : a) vêtement réel ; b) prototype virtuel ; c) vêtement plus pliable ; d) vêtement plus rigide.....	124
Figure 86 : Mensurations anthropométriques du mannequin.....	125
Figure 87 : Huit tailles différentes de T-shirt pour un même mannequin.....	125
Figure 88 : Résultats des modèles linéaires obtenus : (a) D1 largeur d'encolure, (b) D2 largeur d'épaule, (c) D3 contact au niveau de la poitrine, (d) D4 contact au niveau de la taille, (e) D5 longueur du vêtement.....	126
Figure 89 : Performance des modèles de régression linéaire pour les descripteurs D6, D7 et D8 : (a) D7 longueur de manche, (b) D8 restriction de mouvements de bras, (c) D9 Restriction de mouvements du torse.....	127
Figure 90 : Performance du modèle de la régression linéaire pour le descripteur D_9	128
Figure 91 : Préviation du fit d'un nouveau vêtement (nouvelle gradation).	128
Figure 92 : Génération d'un patron adapté à un porteur spécifique à partir de la préviation du fit d'un vêtement existant.	129
Figure 93 : Un nouveau porteur et le fit du vêtement virtuel sur son corps.	129
Figure 94 : Comparaison des vêtements et des patrons associés. (a) vêtement initial ; (b) nouveau vêtement (nouveau style).	130
Figure 95 : Schéma général de l'outil de design pour le styliste et le modéliste.	131
Figure 96 : Relations entre le dessin de style, les patrons et les mesures anthropométriques (facteur de hauteur).	132
Figure 97 : Relations entre le dessin de style, les patrons et les mesures anthropométriques (facteur de contour).	132
Figure 98 : Classification de style du pantalon jean.	133
Figure 99 : Exemple de design des dessins et des patrons pour différents styles de pantalon jean. .	134
Figure 100 : Trois pantalons jean fabriqués à la base des patrons générés par le logiciel.	134
Figure 101 : Procédure de design d'un patron dans un environnement 3D.....	135
Figure 102 : Schéma générale du procès de modélisation d'évaluation de fit.	136
Figure 103 : Procédure de l'essayage réel de cinq postures pour 72 pantalons.....	137
Figure 104 : Positions des 20 points pour obtenir les valeurs de pression.	137
Figure 105 : Procédure du scénario de vente de vêtements en ligne.....	138

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif de la production scientifique depuis 2008.	21
Tableau 2 : Récapitulatif des activités en termes d'encadrements.	21
Tableau 3 : Récapitulatif des enseignements effectués depuis 2007.	22
Tableau 4 : Détails des revues scientifiques.....	35
Tableau 5 : Détail des enseignements effectués durant la préparation de ma thèse de doctorat (2007-2010).	38
Tableau 6 : Détails des enseignements effectués en tant que ATER (2010-2011).....	39
Tableau 7 : Détails des enseignements effectués en qualité de Maître de Conférences (2011-2015).	39
Tableau 8 : Détail des enseignements effectués en tant que Maître de Conférences (2015-2021).....	41
Tableau 9 : Liste des sujets de PFE.	42
Tableau 10 : Liste des élèves en apprentissage sous ma responsabilité.....	43
Tableau 11 : Plan d'expérience Taguchi pour l'étude de durée de vie.	59
Tableau 12 : Constantes du modèle exponentiel descriptif de l'évolution de l'écart de couleur en fonction du temps, déterminées par régression exponentielle et le classement des configurations testées.....	60
Tableau 13 : Pourcentages massiques de PEDOT:PSS absorbé et leurs résistivités surfaciques mesurées.	63
Tableau 14 : Résistance par carré pour quatre tricots commerciaux.	65
Tableau 15 : Listes des mouvements d'activité.	82
Tableau 16 : 8 caractéristiques extraites depuis les données filtrés de l'accéléromètre.	82
Tableau 17 : Précision de modèle de classification.....	82
Tableau 18: Résultat de caractéristique de traction.	85
Tableau 19 : Résultat de mesure de résistance linéique du fil conducteur en polymère.	90
Tableau 20 : Résultat de mesure de la résistance linéique des multifilaments en cuivre nickelé	92
Tableau 21 : Évolution de la résistance après 50 cycles de lavage pour les fils protégés par la technologie de broderie.....	97
Tableau 22 : Impacts dans un processus de lavage complet.	99
Tableau 23 : 3 types de fil conducteur choisis pour les tests mécaniques et les tests de lavage.	109
Tableau 24 : Équation linéaire de régression pour les tests de lavage et les tests mécaniques.....	111
Tableau 25 : Les spécifications des vêtements.	117
Tableau 26 : Mesures morphologiques principales des mannequins.	117
Tableau 27 : Résultat de l'ANOVA pour les quatre scénarios.	118
Tableau 28 : Caractéristiques des 19 échantillons.	119
Tableau 29 : Définitions des neuf descripteurs sensoriels pour une étoffe.....	122

Tableau 30 : Échelle d'évaluation et descriptions sémantiques.	122
Tableau 31 : Descripteurs sensoriels du fit et les mensurations du vêtement.	125
Tableau 32 : Échelle d'évaluation et ses descriptions sémantiquement.	125
Tableau 33 : Résultat de précision de prédiction calculé par la validation croisée à 10 blocs.....	137

Liste des sigles et acronymes

A1 : 1ère année formation par apprentissage ENSAIT

A2 : 2ème année formation par apprentissage ENSAIT

A3 : 3ème année formation par apprentissage ENSAIT

ACL : Article dans une revue internationale ou nationale avec comité de lecture répertoriée dans la base de données Web of Science

ACLN : Article dans une revue internationale ou nationale avec comité de lecture non répertoriée dans la base de données Web of Science

ACF : Anisotropic Conductive Film

ACT : Communication avec acte dans un congrès international ou national

AFF : Communication par affiche dans un congrès international ou national

BLE : Bluetooth Low Energy

CAO : conception assistée par ordinateur

COM : Communication orale sans acte dans un congrès international ou national

COVID-19 : Coronavirus en 2019

DIP : Dual in-line package

PSD : Densité spectrale de puissance

E1 : 1ère année formation initiale ENSAIT

E2 : 2ème année formation initiale ENSAIT

E3 : 3ème année formation initiale ENSAIT

ECG : Electrocardiogram

FTIR-ATR : Fourier-transform infrared spectroscopy - Attenuated total reflection

HEFF : Elèves de la Haute Ecole Francisco Ferrer de Bruxelles

I²C: Inter Integrated Circuit

IRM : Imagerie par résonance magnétique

ITO : Indium-Tin Oxide

LP TUT : Licence Professionnelle Textiles à Usages Techniques (USTL, ENSAIT)

MEB : Microscopie électronique à balayage

P3HT RR : Poly(3-hexylthiophène) régiorégulier

PEDOT:PSS : un mélange de deux polymère : le poly(3,4-éthylènedioxythiophène) (PEDOT) et le poly(styrène sulfonate) de sodium (PSS)

PDMS : Polydiméthylsiloxane

PHP : Hypertext Preprocessor

OS : Chapitre d'ouvrage

RPM : Révolution par minute

RVB : Un système de codage informatique des couleurs, rouge, vert et bleu

SOIC : Small outline integrated circuit

SSOP : Shrink small-outline package

SPI : Serial peripheral interface

SRR : Sprint Ring Resonator

TPU : Thermoplastique PolyUréthane

TSOP : Thin small-outline package

TTRI : Taiwan Textile Research Institute

Introduction

Je suis arrivé à l'ENSAIT en 2005 pour suivre une formation d'ingénieur Textile. J'ai obtenu mon doctorat en 2010 sur le sujet de « Systèmes textiles intelligents ». Après une année passée sur un poste d'ATER, j'ai été nommé Maître de Conférences à l'ENSAIT en 2011. En termes d'activités scientifiques, je me positionne dans le groupe HCD (Human Centred Design) du laboratoire GEMTEX (Génie des Matériaux Textiles). Ayant suivi deux cursus de formation pédagogique (textile et automatique), pendant mes études dans les établissements d'enseignement supérieur en Chine, je me suis intéressé à la thématique des « textiles intelligents ». Ainsi, ce mémoire synthétise l'essentiel de mes activités de recherches et pédagogiques au sein de l'ENSAIT et de son laboratoire GEMTEX, depuis la soutenance de ma thèse de Doctorat.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une présentation synthétique de mes activités de recherches, d'enseignements et administratives. J'y résume dans la section 3 ma propre approche de la thématique « Textiles Intelligents » (e-textiles, intégration des systèmes électroniques dans la structure textile, la fiabilisation et la lavabilité des systèmes textiles intelligents ainsi que la conception orientée vers les interactions homme-machine) qui représente le résultat de la rencontre entre une formation en Génie Textile et en Automatique. La section suivante récapitule mes activités pédagogiques. J'ai également participé à la réforme pédagogique de l'ENSAIT pour mieux répondre aux besoins de nos étudiants. La dernière section décrit mes activités administratives et responsabilités collectives.

Le deuxième chapitre présente mes travaux sur les textiles électroniques. En premier lieu, j'expose mes recherches sur la réalisation des transistors fibreux. Dans un deuxième temps, je décris le développement des afficheurs textiles électrochromes. La troisième partie de ce chapitre est consacrée à la réalisation des électrodes textiles pour l'acquisition de l'électrocardiogrammes (ECG). La dernière partie concerne mes travaux sur la réalisation des antennes textiles.

Le troisième chapitre de ce mémoire est consacré à mon travail sur l'intégration des dispositifs électroniques aux structures textiles. Dans ce chapitre, l'évolution de mes recherches sur la réalisation du circuit électrique à partir des supports rigides jusqu'aux supports textiles, est présentée et discutée.

Le quatrième chapitre traite mes travaux sur la fiabilité, la durabilité et la lavabilité des systèmes textiles intelligents. L'objectif principal de ces travaux est de répondre à la question « comment protéger les textiles intelligents contre le lavage ? ». La première approche de la protection des systèmes textiles intelligents consiste en le laminage d'un film thermoplastique. La technique de broderie et l'encapsulation dans du silicone ont ensuite été mises au point. Pour mieux comprendre les impacts néfastes du processus de lavage, les travaux sur l'analyse de ce processus et la simulation des impacts par des tests mécaniques ont été réalisés dans le cadre de mes divers projets.

Le dernier chapitre de ce rapport est consacré aux travaux sur la mise au point de la conception orientée vers les interactions homme-machine pour les plateformes numériques de co-création de vêtements. Au début de ce chapitre, je présente le développement d'une plateforme de « co-création ». Ensuite, je décris deux techniques de création pour les stylistes

et modélistes. Enfin, je propose une méthode de modélisation d'évaluation de l'ajustement de vêtements en tenant compte des valeurs de pression pendant l'essayage virtuel.

Première Partie – Présentation synthétique des activités de recherche, d'enseignement et administratives

1 Curriculum Vitae

TAO Xuyuan

Date de naissance : 20 octobre 1981

Nationalité : Française

Fonction actuelle : Maître de Conférences (depuis 2011)

Établissement d'affectation : ENSAIT (Roubaix), Laboratoire GEMTEX (EA 2461)

Bénéficiaire d'une PEDR depuis le 01/09/2018

Situation familiale : Marié, 1 enfant

Adresse Professionnelle : ENSAIT, GEMTEX, 2 Allée Louise et Victor Champier, 59056 Roubaix Cedex 1, France

Adresse mail : xuyuan.tao@ensait.fr

Téléphone : +33 (0)3 20 25 86 83

NUMEN : 09S1100377JQE

Parcours académique

2010 Thèse en Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal, Université de Lille 1 (mention très honorable), Villeneuve d'Ascq, France (Bourse ministérielle)

Titre : « Systèmes intelligents intégrés aux structures textile »

Travaux menés à l'ENSAIT cotutelle avec l'IEMN de Villeneuve d'Ascq.

Soutenue devant :

Prof. Mireille BAYART, Polytech' Lille (Président du jury)

Prof. Lieva VAN LANGENHOVE, Université de Gand (Rapporteur)

Prof. Bernard RATIER, Université de Limoges (Rapporteur)

Ing. Isabelle CHARTIER, CEA Centre de Grenoble (Examineur)

Prof. Vladan KONCAR, ENSAIT (Directeur de thèse)

Dr. Claude DUFOUR, IEMN (Co-Directeur de thèse)

Qualification dans les sections CNU 28 (Milieux denses et matériaux) et 63 (Génie électrique, électronique, photonique et systèmes)

2008 Master Recherche en Matériaux Textile à l'Université de Donghua, Shanghai, Chine

2007 Master Recherche en Automatique, Génie Informatique et Image, Université de Lille 1, Villeneuve d'Ascq, France (Classement 1er sur 23)

2007 Diplôme d'Ingénieur en textile, ENSAIT, Roubaix, France

2004 Licence en Génie Textile, Université de Donghua, Shanghai, Chine

2004 Licence en Automatique, Université Jiao-Tong de Shanghai, Shanghai, Chine

Parcours professionnel

Depuis 09/2011 Maître de Conférences à l'ENSAIT, Roubaix, France

09/2010- 08/2011 ATER à l'ENSAIT, Roubaix, France

09/2007- 08/2010 Doctorat en Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal, Université de Lille 1, Villeneuve d'Ascq, France. Travaux menés à l'ENSAIT cotutelle avec l'IEMN de Villeneuve d'Ascq.

Activités administratives

Depuis 2017 Membre élu du Conseil Administratif de l'ENSAIT

Depuis 2017 Membre élu du Conseil de Discipline de l'ENSAIT

Depuis 2014 Membre élu du Conseil de Laboratoire GEMTEX

2 Récapitulatifs des activités pédagogiques et de recherches

Le Tableau 1 récapitule, par année, mes activités en termes de production scientifique.

Tableau 1 : Récapitulatif de la production scientifique depuis 2008.

	Années	ACL [1]–[29]	OS [30]–[32]	ACLN [33]–[36]	ACT [37]–[57]	COM [58]	AFF [59], [60]
PhD.	2008			1	1		
	2009	1					
	2010			1	1		1
ATER	2011	1					
Maître de conférences	2012	1					
	2013	2			2		
	2014	1			3		
	2015	1			1		
	2016	1	2		2		
	2017	2			3		
	2018	6	1		3		
	2019	6		2	3		1
	2020	4			1	1	
	2021	2					
Total		29	3	4	21	1	2

Le Tableau 2 récapitule, par année, mes activités en termes d'encadrements.

Tableau 2 : Récapitulatif des activités en termes d'encadrements.

Années	Nombre de thèses de doctorat en cours	Nombre de Post-docs en cours
2012	2	
2013	2	
2014	3	
2015	4	
2016	3	
2017	4	
2018	4	
2019	6	2
2020	5	2
2021	5	3

Le Tableau 3 synthétise, par année et par discipline, les heures d'enseignements donnés depuis 2007. Chaque case est renseignée par le type de présentiel (CM, TD et TP), le public (E1, E2, E3, A1, A2 et A3) et le nombre total d'heures équivalent TD. Les détails des cours seront présentés dans la section 4.1 (page 37). En année 2011-2012, j'assurais les TPs d'un ATER qui était en arrêt maladie. Donc, le nombre total d'heures de cours a été beaucoup plus important que d'habitude. En 2019-2020, à cause de confinement, plusieurs TPs n'ont pas été réalisés. Par conséquent, le nombre total d'heures est moins important.

Tableau 3 : Récapitulatif des enseignements effectués depuis 2007.

Années	Public	Type de cours	Heures effectuées équivalentes TD
2007-2008	E1, E2, E3	TD	54
2008-2009	E2, E3, A3, LP TUT	CM, TD, TP	139
2009-2010	E2, E3, A3, LP TUT	CM, TD, TP	139
2010-2011	E2, E3, A1, A3, SI	CM, TD, TP	213
2011-2012	E1, A1, A3, SI	CM, TD, TP	300
2012-2013	E1, A1, A2, SI, HEFF	CM, TD, TP	177,5
2013-2014	E1, E2, A1, A2, A3, SI	CM, TD, TP	239
2014-2015	E1, E2, A1, A2, A3, SI	CM, TD, TP	142
2015-2016	E1, E2, A1, A2, A3, SI	CM, TD, TP	185
2016-2017	E1, A1, A2, A3, SI	CM, TD, TP	201
2017-2018	E1, E3, A1, A2, SI	CM, TD, TP	208
2018-2019	E1, E3, A1, A2, SI	CM, TD, TP	220
2019-2020	E1, E3, A1, A2	CM, TD, TP	151

3 Synthèse des activités de recherche

3.1 Résumé de mes thématiques de recherches

3.1.1 Introduction

Mon intégration au sein de l'ENSAIT, en tant qu'élève d'ingénieur, a commencé en 2005 dans le cadre du cursus « Double Diplôme » avec l'université de Donghua de Shanghai. Après deux années d'études en programme ingénieur textile et trois années de préparation de ma thèse de doctorat au laboratoire GEMTEX de l'ENSAIT, j'ai pu me concentrer sur les recherches dans le domaine des e-textiles et de la conception orientée vers les interactions homme-machine.

Ainsi, mes thématiques de recherche ont suivi deux grands axes : i) système e-textiles contenant les structures souples et les micro systèmes électroniques intégrés et ii) conception orientée vers les interactions homme-machine.

Les textiles intelligents en tant qu'un sous-ensemble des e-textiles sont des systèmes intégrant des capteurs, des actionneurs et des dispositifs de décision. Ces textiles réagissent avec l'environnement de façon mécanique, thermique, chimique, électronique ou encore magnétique, de manière automatique et contrôlée. Ces systèmes innovants permettent d'avoir des fonctionnalités utiles pour les vêtements de protection individuelle, le secteur des transports, le bâtiment et le génie civil, les sports et loisirs, le domaine médical, les géotextiles, etc. Mes activités scientifiques dans le domaine des textiles intelligents se concentrent sur les aspects liés à l'intégration des systèmes électroniques, des modules de décision et de gestion avec microcontrôleur. Le développement des capteurs et actionneurs adaptés, des logiciels de pilotage et des systèmes d'exploitation spécifiques, des modules de communication et de contrôle représentent l'essentiel de mes activités scientifiques au GEMTEX et dans le cadre de collaborations au niveau régional, national et international.

Mes recherches liées à la conception orientée vers les interactions homme-machine se focalisent sur la construction de plateformes numériques de co-création de vêtements impliquant la réalité virtuelle, la perception de consommateurs, le machine learning, l'aide à la décision, la modélisation, l'optimisation et la classification de données.

Les sections suivantes décrivent de manière synthétique mes travaux de recherche sur

- Les e-textiles ;
- L'intégration des systèmes électroniques dans des structures textiles ;
- La fiabilisation, la durabilité et la lavabilité des systèmes textiles intelligents ;
- La mise au point des méthodes de la conception orientée vers les interactions homme-machine pour les plateformes numériques de co-création de vêtements.

3.1.2 Travaux sur les e-textiles

La première thématique de recherche présentée dans cette section porte sur la réalisation de composants textiles électroniques dédiés aux structures e-textiles. Il s'agit de réalisation de transistors fibreux, d'afficheurs textiles et de capteurs ECG (électrocardiogramme).

Pendant la préparation de ma thèse de doctorat, j'ai réalisé deux types de transistors fibreux : transistors fibreux organiques à effet de champ et transistors fibreux organiques électrochimiques. Ces travaux ont été menés en collaboration avec l'équipe de recherche Nanostructures et Composants Moléculaires (NCM) de l'Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) situé à Villeneuve d'Ascq.

La seconde thématique porte sur la réalisation des cellules électrochromes flexibles textiles. Ces développements ont été entrepris dans le cadre des projets HomoTextilus (ANR) et LITEVA (FUI) dans le contexte très général des « textiles communicants » pour des applications liées à l'évènementiel. Ces travaux ont permis de développer une structure électrochrome à base de polymère conducteur intrinsèque intégrée aux textiles ou réalisée par des procédés textiles. Plusieurs générations d'afficheurs électrochromes ont été conçues et fabriquées. Leurs durées de vie et les propriétés électro mécaniques ont été étudiées.

La troisième thématique concernant les textiles électroniques consiste en la réalisation de capteurs ECG pendant l'exécution du projet européen EtextWeld (Horizon 2020). Le capteur ECG a été réalisé par un procédé de tricotage en utilisant le fil conducteur électrique. La structure tricotée a ensuite été intégrée dans un système plus complexe électronique capable d'acquies les signaux physiologiques.

Ensuite, ces capteurs ECG textiles ont été intégrés aux systèmes d'acquisition de signaux ECG et de communication des données vers un « Cloud » pour des traitements en temps réel, au sein du projet @Health (Thèse de doctorat CIFRE).

Une nouvelle génération de capteurs ECG dédiés à l'acquisition des signaux ECG multidimensionnels (3D) a été conçue et réalisée par la technologie de broderie plus récemment. Cette étude, toujours en cours, a été réalisée dans le cadre d'un projet privé pour « University College of London » (UCL) et son Hôpital. L'objectif final étant de réaliser une veste contenant 256 petits capteurs (électrodes textiles) réutilisable pour le monitoring des activités cardiaques similaire au monitoring IRM (Image par résonance magnétique), en temps réel. Ce nouveau monitoring ECG en 3D obtenu par le traitement informatique des 256 signaux ECG détectés à des emplacements différents sur la poitrine est susceptible de générer des images cardiaques en haute résolution, sans l'utilisation d'une IRM.

Finalement la quatrième thématique concerne la conception et la fabrication des composants électroniques textiles dédiés à la fabrication d'antennes souples capables de récupérer l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques à des fréquences différentes. La récupération d'énergie à courte distance (moins de quelques centimètres) est réalisée par la

technologie NFC (Near Field Communication à 13,56 MHz). La récupération d'énergie à des distances plus importantes (plusieurs centaines de mètres) est réalisée en utilisant des méta-matériaux possédant la permittivité électrique et la perméabilité magnétique négatives. Ces structures méta-matériaux ont déjà été réalisées au sein du laboratoire GEMTEX par les technologies textiles, telles que le tissage ou la broderie. Ce projet est réalisé en partenariat avec l'IEMN dans le cadre du projet LUMINOPTX (EU Interreg V) portant sur la mise au point de textiles permettant le transfert de données par du guidage d'ondes de surface pour applications dans le domaine des vêtements connectés.

3.1.3 Travaux sur l'intégration des systèmes électroniques dans des structures textiles

Les travaux décrits dans cette section concernent l'intégration de composants électroniques dans les structures textiles. Le premier essai de l'intégration a été réalisé pendant ma thèse de doctorat en utilisant les transistors fibreux et les fils conducteurs pour réaliser un circuit NON-OU (NOR) et un circuit analogique d'amplificateur.

L'objectif actuel consiste à intégrer des circuits électroniques rigides ou semi-rigides dans des structures textiles. Ainsi, dans le cadre du projet HomoTextilus (ANR), un circuit électronique rigide est monté sur un T-shirt pour contrôler quatre cellules électrochromes. Pendant le projet EtexWeld (H2020), plusieurs essais ont été réalisés pour intégrer un circuit intégré multicouche capables d'enregistrer des paramètres physiologiques et les accélérations en x, y et z des pompiers et de les envoyer, en utilisant le protocole de communication Zig Bee, vers une base de supervision.

Afin de réaliser une intégration fiable, compatible avec les textiles et quasiment transparente à l'utilisateur, un processus d'intégration par la technologie de broderie, utilisant un circuit électronique souple (PCB flexible) comme interface, a été développé. Ce travail a été mené en collaboration avec « Taiwan Textile Research Institute » (TTIR) situé à Taipei dans le cadre du projet HomoTextilus (Horizon 2020). Le circuit souple a été intégré dans un ruban textile et un T-shirt pour capter les signaux ECG et de respiration, la température de la peau et les accélérations selon les directions x, y et z, pour détecter les fonctions vitales et les mouvements du porteur.

Le dernier développement relatif à ces travaux de recherche concerne la réalisation d'un circuit électronique sans le support PCB (Printed Circuit Board) en intégrant les composants électroniques directement sur l'étoffe. Ainsi, nous avons développé un fil textile compatible avec le processus de soudure. Par conséquent, plusieurs circuits électroniques sont réalisés en intégrant des LEDs et des composants électroniques (deux verrous et un convertisseur série vers parallèle) dans le cadre du projet collaboratif LUMINOPTX (EU Interreg V).

3.1.4 Travaux sur la fiabilisation, la durabilité et la lavabilité des systèmes textiles intelligents

Les travaux concernant les concepts de fiabilité, de durabilité et de lavabilité ont été menés dans le projet EtexWeld (Horizon 2020). En effet, il existe beaucoup de prototypes e-textiles élaborés en laboratoires de recherche. Cependant, il y a peu de produits matures, disponibles sur le marché. Le verrou technologique qui empêche la présence de ces produits sur le marché se situe dans leur fiabilité insuffisante et dans les difficultés de les laver ou les nettoyer.

Pendant le projet EtexWeld, nous avons commencé à étudier l'efficacité des protections des e-textiles lors du processus de lavage. Plusieurs méthodes sont employées pour protéger les fils conducteurs, les composants électroniques et les circuits électroniques intégrés. Il s'agit

d'application des couches de silicone, de films thermoplastiques, ou de l'utilisation de la technique de broderie.

Nous avons également étudié le processus de lavage domestique. Ceci nous a permis de recenser, puis de hiérarchiser les contraintes auxquelles sont soumis les e-textiles. Ces travaux débouchent sur les propositions de tests standardisés équivalents au lavage, dans le but d'évaluer ou de prévoir la résistance au lavage domestique des produits e-textiles.

3.1.5 Travaux sur la construction de la conception orientée vers les interactions homme-machine pour les plateformes numériques de co-crédation de vêtements

Dans un contexte économique où les concurrences internationales sont exacerbées, la customisation, ou personnalisation de masse des produits devient une stratégie très importante des entreprises pour améliorer la valeur perçue de leurs produits. Nous avons développé des concepts orientés vers les interactions homme-machine pour établir une plateforme numérique de co-crédation de vêtements. Ces travaux ont débuté dans le cadre du projet Camille3DS (FUI) en collaboration avec les groupes « IDgroup » et « Damartex ». Ainsi, nous avons pu développer une plateforme de « co-crédation » comprenant deux fonctions. Premièrement, elle permet de mettre en place une cabine virtuelle d'essayage du vêtement, incluant une nouvelle expérience sensorielle dans une boutique physique, ou sur tout autre support multimédia. Deuxièmement, elle comprend un processus de co-crédation, permettant aux commerçants, aux créateurs et aux clients d'acquérir conjointement une nouvelle expérience sur le développement de vêtements customisés à forte valeur ajoutée.

Le design et le bien aller d'un vêtement jouent un rôle majeur pour l'industrie du textile-habillement. Les consommateurs sont en général attirés par un style ajusté et des couleurs très tendances. Ces critères sont essentiels, car ils interviennent dans l'acte d'achat d'un vêtement. Afin de développer un produit ajusté à la morphologie du consommateur, designers et modélistes doivent modifier maintes et maintes fois leurs styles et patronages, afin de satisfaire les exigences des consommateurs. Actuellement, trois inconvénients majeurs apparaissent dans le processus de création et d'évaluation d'un vêtement : il est très coûteux en temps pour une efficacité moindre, il est subordonné à l'expérience des designers et modélistes, il n'est pas adapté au e-commerce. Afin de résoudre ces trois problématiques, nous avons développé trois outils numériques pour fournir des solutions de conception et d'évaluation de vêtement basées sur la connaissance humaine.

Les travaux plus récents concernant la conception de co-crédation nous ont conduit à la réalisation d'un modèle d'évaluation sensorielle cognitive de mode, entre les créateurs et les consommateurs. Nous avons classifié plusieurs dessins de mode et formalisé la connaissance basée sur ces dessins afin de développer un système de recommandation pour les consommateurs.

3.2 Encadrements de thèses et de post-docs

3.2.1 Stages Post-Doctorat

Nom et Prénom	ISMAR Ezgi
Titre du travail	Réalisation d'antennes brodées pour la récupération d'énergie RF
Période	09/2019-03/2020
Projet financé	LUMINOPTX (EU Interreg V)
Mon encadrement	33%
Autres co-directeurs	COCHRANE Cédric 33%, RAULT François 33%
Les publications	[19], [25]

Nom et Prénom	DUBEY Amarish
Titre du travail	Écrans flexibles électrochromes pour tableau de bord de voiture autonome
Période	09/2018-03/2021
Projet financé	LITEVA (FUI)
Mon encadrement	33%
Autres co-directeurs	KONCAR Vladan 33%, COCHRANE Cédric 33%
Les publications	[27]

3.2.2 Thèses de Doctorat

Nom et Prénom	CHEN Xiao
Diplôme	Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images
Titre du travail	Contrôle et optimisation de la perception humaine sur les vêtements virtuels par évaluation sensorielle et apprentissage
Période	02/2012-03/2015
École doctorale	École doctorale Sciences pour l'ingénieur université Lille
Mon encadrement	33%
Autres co-directeurs	ZENG Xianyi 34%, KOEHL Ludovic 33%
Les publications	[7], [15], [41], [42]
Devenir de docteur	Secteur privé

Nom et Prénom	MORETTI Constance
Diplôme	Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images
Titre du travail	Contribution à la création et à la commande d'écrans textiles flexibles électrochromes
Période	09/2012-09/2015
École doctorale	École doctorale Sciences pour l'ingénieur université Lille
Mon encadrement	33%
Autres co-directeurs	KONCAR Vladan 34%, KOEHL Ludovic 33%
Les publications	[6], [30], [39], [40], [43]
Devenir de docteur	Secteur privé

Nom et Prénom	LIU Kaixuan
Diplôme	Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images
Titre du travail	Study on knowledge-based garment design and fit evaluation system
Période	09/2014-03/2017
École doctorale	École doctorale Sciences pour l'ingénieur université Lille

Mon encadrement	30%
Autres co-directeurs	WANG Jianping 10% ZENG Xianyi 30%, BRUNIAUX Pascal 30%
Les publications	[8], [9], [13], [14], [20], [21], [32], [45], [46]
Devenir de docteur	Recherche publique et académique

Nom et Prénom	DEWASCH Paul
Diplôme	Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images
Titre du travail	Développement d'une solution pour la traçabilité des textiles à l'échelle des fibres/filaments
Période	09/2015-04/2017 (abandonnée)
École doctorale	École doctorale Sciences pour l'ingénieur université Lille
Mon encadrement	33%
Autres co-directeurs	KOEHL Ludovic 33%, CAMPAGNE Christine 34%
Devenir de docteur	Secteur privé

Nom et Prénom	ANKHILI Amale
Diplôme	Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images
Titre du travail	Développement de textiles instrumentés intégrant des électrodes organiques de mesure de bio potentiel et de bio impédance
Période	07/2016-06/2019
École doctorale	École doctorale Sciences pour l'ingénieur université Lille
Mon encadrement	33%
Autres co-directeurs	KONCAR Vladan 33%, COCHRANE Cédric 33%
Les publications	[11], [12], [17], [18], [35], [36]
Devenir de docteur	Secteur privé

Nom et Prénom	WANG Kaichen
Diplôme	Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images
Titre du travail	Contribution to the development of a big data platform and its applications for the textile industry
Période	01/2018-12/2020
École doctorale	École doctorale de l'école centrale de Lille
Mon encadrement	50%
Autres co-directeurs	CHEN Yu 10% KOEHL Ludovic 40%
Les publications	[23], [53], [56]
Devenir de docteur	

Nom et Prénom	ZAMAN Shahood Uz
Diplôme	Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images
Titre du travail	Smart textiles and problems of connectivity and encapsulation of electronic devices in order to make textronic systems reliable and washable
Période	18/09/2017-en cours
École doctorale	École doctorale Sciences pour l'ingénieur université Lille
Mon encadrement	33%
Autres co-directeurs	KONCAR Vladan 33%, COCHRANE Cédric 33%
Les publications	[17], [19], [22], [26], [36], [52], [54]
Devenir docteur	

Nom et Prénom	ZHANG Mengyun
Diplôme	Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images

Titre du travail	Fashion Pattern Recommendation System Based on Sensory Evaluation and Cognition
Période	09/2018-en cours
École doctorale	École doctorale de l'école centrale de Lille
Mon encadrement	50%
Autres co-directeurs	BRUNIAUX Pascal 50%
Les publications	

Nom et Prénom	CHENG Pengpeng
Diplôme	Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et des Images
Titre du travail	The Influence of Skiing Posture on Fit of Skiing Clothing Based on Human-Clothing Model
Période	11/2020-en cours
École doctorale	École doctorale de l'école centrale de Lille
Mon encadrement	33%
Autres co-directeurs	ZENG Xianyi 34% BRUNIAUX Pascal 33%
Les publications	

3.3 Collaborations et contrats de recherche

3.3.1 Contrats de recherche collaboratifs

Nom	Qualité perçue virtuelle et réelle, améliorée perception du toucher, et de l'acoustique au travers d'une image			
Partenaires	ID Group, Audiogaming, GEMTEX, Idées 3Com, LIP6, Telmat, Instore Solution, Damart, Visteon, LIFL			
Période	Type de projet	Acronyme	Budget Total	Rôle
2012-2015	FUI	Camille3DS	4 000 000€	Encadrant de thèse

Nom	Le Vêtement Interactif et ses accessoires : prospection de l'habillement intelligent du corps			
Partenaires	CHART-LUTIN, GEMTEX, LIP6, INRIA, RCP, TOMORROWLAND			
Période	Type de projet	Acronyme	Budget Total	Rôle
2012-2015	ANR	HomoTextilus	600 000€	Encadrant de thèse

Nom	Welding of E-Textiles for Interactive Clothing			
Partenaires	ITU(TR), ENSAIT (FR), TEIP (EL), TMET (EL), HK PolyU (HK), TTRI (TW), Kings Metal (TW), Inlas (SI), Kivanc (TR)			
Période	Type de projet	Acronyme	Budget Total	Rôle
2015-2018	EU H2020	ETexWeld	1 282 500€	Chercheur Dissemination Manager

Nom	Nouveaux textiles intelligents pour de l'éclairage ambiant autonome			
Partenaires	MATERIA (WA), Université Lille1 (FR), CIRMAR (WA), ENSAIT (FR), CENTEXBEL (VL), UCL (WA)			
Période	Type de projet	Acronyme	Budget Total	Rôle
2016-2020	EU INTERREG V	LUMINOPTX	2 127 058€	Chercheur

Nom	Advanced Technologies for Textile and Fashion Industry			
Partenaires	KTU(Lituanie), PUAS, (Grece), IDEC (Grece), UBI (Portugal), UPV (Spain), ENSAIT (France), LATIA (Lithuanie), HCIA (Grece)			

Période	Type de projet	Acronyme	Budget Total	Rôle
2017-2019	EU Erasmus	TEXMODA	266 851 €	Enseignant-Chercheur

Nom	Lighting Interieur Textile pour Véhicule Autonome			
Partenaires	EFI Lighting, Brochier Technologies, CTRE Technique Industriel de la Plasturgie et des composites, Elkem Silicones, ENSIAT, MB Texinov, Moulinage du Solier, PSA, Trèves TSC Intertex			
Période	Type de projet	Acronyme	Budget Total	Rôle
2018-2021	FUI	LITEVA	1 933 996 €	Enseignant-Chercheur

3.3.2 Contrat de recherche de gré à gré (projet privé)

Nom	Développement de textiles instrumentés intégrant des électrodes organiques de mesure de bio potentiel et de bio impédance		
Entreprises	@Health		
Période	Budget Total	Rôle	
2016-2019	75 000 €	Encadrant de thèse	

Nom	Réalisation de prototypes de gants connectés		
Entreprises	INEO NORD PICARDIE		
Période	Budget Total	Rôle	
2018	900 €	Responsable du projet	

Nom	Realization of core CMR-conditional ECGi prototypes for use in the MyoFit45 project		
Entreprises	University College London		
Période	Budget Total	Rôle	
2019	21 160 €	Responsable du projet	

Nom	Tapis de bain intelligent BBalance, pour une application en télémédecine et prévention à domicile		
Entreprises	SAS MATEO		
Période	Budget Total	Rôle	
2019	5 093 €	Responsable du projet	

3.4 Publications, communications et rayonnement

3.4.1 ACL, 29 références

Listes des articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriés dans la base de données Web of Science.

[1] X. Tao *et al.*, « CO₂ laser-induced crystallization of sol-gel-derived indium tin oxide films », *Appl. Phys. A*, vol. 96, n° 3, p. 741-749, août 2009, doi: 10.1007/s00339-009-5157-7. (IF=1,810)

[2] X. Tao, V. Koncar, et C. Dufour, « Geometry Pattern for the Wire Organic Electrochemical Textile Transistor », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 158, n° 5, p. H572, mars 2011, doi: 10.1149/1.3562962. (IF=3,721)

- [3] X. Tao, V. Koncar, et D. Claude, « Realization of fibrous electrochemical transistors and textile electronic circuits », *Actual. Chim.*, n° 360-361, p. 65-68, févr. 2012. (IF=0,145)
- [4] R. Dufour *et al.*, « Electrowetting on functional fibers », *Soft Matter*, vol. 9, n° 2, p. 492-497, 2013, doi: 10.1039/C2SM26295A. (IF=3,140)
- [5] X. Tao et P. Bruniaux, « Toward advanced three-dimensional modeling of garment prototype from draping technique », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 25, n° 4, p. 266-283, janv. 2013, doi: 10.1108/09556221311326301. (IF=0,589)
- [6] C. Moretti, X. Tao, V. Koncar, et L. Koehl, « A Study on Electrical Performances and Lifetime of a Flexible Electrochromic Textile Device », *Autex Res. J.*, vol. 14, n° 2, p. 76-81, juin 2014, doi: 10.2478/aut-2014-0003. (IF=1,000)
- [7] X. Chen, X. Tao, X. Zeng, L. Koehl, et J. Boulenguez-Phippen, « Control and optimization of human perception on virtual garment products by learning from experimental data », *Knowl.-Based Syst.*, vol. 87, p. 92-101, oct. 2015, doi: 10.1016/j.knosys.2015.05.031. (IF=5,921)
- [8] K. Liu, J. Wang, X. Tao, X. Zeng, P. Bruniaux, et E. Kamalha, « Fuzzy classification of young women's lower body based on anthropometric measurement », *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 55, p. 60-68, sept. 2016, doi: 10.1016/j.ergon.2016.07.008. (IF=1,662)
- [9] K. Liu, X. Zeng, P. Bruniaux, J. Wang, E. Kamalha, et X. Tao, « Fit evaluation of virtual garment try-on by learning from digital pressure data », *Knowl.-Based Syst.*, vol. 133, p. 174-182, oct. 2017, doi: 10.1016/j.knosys.2017.07.007. (IF=5,921)
- [10] X. Tao, V. Koncar, T.-H. Huang, C.-L. Shen, Y.-C. Ko, et G.-T. Jou, « How to Make Reliable, Washable, and Wearable Textronic Devices », *Sensors*, vol. 17, n° 4, Art. n° 4, avr. 2017, doi: 10.3390/s17040673. (IF=3,275)
- [11] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, V. Koncar, D. Coulon, et J.-M. Tarlet, « Comparative Study on Conductive Knitted Fabric Electrodes for Long-Term Electrocardiography Monitoring: Silver-Plated and PEDOT:PSS Coated Fabrics », *Sensors*, vol. 18, n° 11, Art. n° 11, nov. 2018, doi: 10.3390/s18113890. (IF=3,275)
- [12] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, D. Coulon, et V. Koncar, « Washable and Reliable Textile Electrodes Embedded into Underwear Fabric for Electrocardiography (ECG) Monitoring », *Materials*, vol. 11, n° 2, Art. n° 2, févr. 2018, doi: 10.3390/ma11020256. (IF=3,057)
- [13] K. Liu *et al.*, « 3D interactive garment pattern-making technology », *Comput.-Aided Des.*, vol. 104, p. 113-124, nov. 2018, doi: 10.1016/j.cad.2018.07.003. (IF=3,156)
- [14] K. Liu *et al.*, « Parametric design of garment flat based on body dimension », *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 65, p. 46-59, mai 2018, doi: 10.1016/j.ergon.2018.01.013. (IF=1,662)
- [15] X. Tao, X. Chen, X. Zeng, et L. Koehl, « A customized garment collaborative design process by using virtual reality and sensory evaluation on garment fit », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 115, p. 683-695, janv. 2018, doi: 10.1016/j.cie.2017.10.023. (IF=4,135)
- [16] X. Tao, T.-H. Huang, C.-L. Shen, Y.-C. Ko, G.-T. Jou, et V. Koncar, « Bluetooth Low Energy-Based Washable Wearable Activity Motion and Electrocardiogram Textronic Monitoring and Communicating System », *Adv. Mater. Technol.*, vol. 3, n° 10, p. 1700309, 2018, doi: 10.1002/admt.201700309. (IF=5,969)
- [17] A. Ankhili, S. U. Zaman, X. Tao, C. Cochrane, V. Koncar, et D. Coulon, « How to Connect Conductive Flexible Textile Tracks to Skin Electrocardiography Electrodes and Protect Them

- Against Washing », *IEEE Sens. J.*, vol. 19, n° 24, p. 11995-12002, déc. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2938333. (IF=3,073)
- [18] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, V. Koncar, D. Coulon, et J.-M. Tarlet, « Ambulatory Evaluation of ECG Signals Obtained Using Washable Textile-Based Electrodes Made with Chemically Modified PEDOT:PSS », *Sensors*, vol. 19, n° 2, Art. n° 2, janv. 2019, doi: 10.3390/s19020416. (IF=3,275)
- [19] E. Ismar, S. uz Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Effect of Water and Chemical Stresses on the Silver Coated Polyamide Yarns », *Fibers Polym.*, vol. 20, n° 12, p. 2604-2610, déc. 2019, doi: 10.1007/s12221-019-9266-4. (IF=1,797)
- [20] K. Liu, X. Zeng, X. Tao, et P. Bruniaux, « Associate Design of Fashion Sketch and Pattern », *IEEE Access*, vol. 7, p. 48830-48837, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906261. (IF=3,745)
- [21] K. Liu, C. Zhu, X. Tao, P. Bruniaux, et X. Zeng, « Parametric design of garment pattern based on body dimensions », *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 72, p. 212-221, juill. 2019, doi: 10.1016/j.ergon.2019.05.012. (IF=1,662)
- [22] S. U. ZAMAN, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Launderability of Conductive Polymer Yarns Used for Connections of E-textile Modules: Mechanical Stresses », *Fibers Polym.*, vol. 20, n° 11, p. 2355-2366, nov. 2019, doi: 10.1007/s12221-019-9325-x. (IF=1,797)
- [23] K. Wang, V. Kumar, X. Zeng, L. Koehl, X. Tao, et Y. Chen, « Development of a Textile Coding Tag for the Traceability in Textile Supply Chain by Using Pattern Recognition and Robust Deep Learning », *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol. 12, n° 2, p. 713-722, mai 2019, doi: 10.2991/ijcis.d.190704.002. (IF=1,838)
- [24] J. Hao, A. Djouadi, F. Rault, X. Tao, É. Lheurette, et L. Burgnies, « Multiresonant Split Ring Resonator with Meandered Strips », *Phys. Status Solidi A*, vol. 217, n° 6, p. 1901017, 2020, doi: 10.1002/pssa.201901017. (IF=1,759)
- [25] E. Ismar, X. Tao, F. Rault, F. Dassonville, et C. Cochrane, « Towards Embroidered Circuit Board From Conductive Yarns for E-Textiles », *IEEE Access*, vol. 8, p. 155329-155336, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018759. (IF=3,745)
- [26] S. uz Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Understanding the Washing Damage to Textile ECG Dry Skin Electrodes, Embroidered and Fabric-Based; set up of Equivalent Laboratory Tests », *Sensors*, vol. 20, n° 5, Art. n° 5, janv. 2020, doi: 10.3390/s20051272. (IF=3,275)
- [27] A. Dubey, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Textile Based Three-Layer Robust Flexible and Stable Electrochromic Display », *IEEE Access*, vol. 8, p. 182918-182929, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028655. (IF=3,745)
- [28] S. uz Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « E-Textile Systems Reliability Assessment—A Miniaturized Accelerometer Used to Investigate Damage during Their Washing », *Sensors*, vol. 21, n° 2, Art. n° 2, janv. 2021, doi: 10.3390/s21020605. (IF=3,275)
- [29] S. Eryuruk, H. Gidik, V. Koncar, F. Kalaoglu, X. Tao, et Y. Saglam, « Heat and moisture transfer properties of a firefighter clothing with a new fire-resistant underwear », *J. Ind. Text.*, p. 1528083721993775, févr. 2021, doi: 10.1177/1528083721993775. (IF=2,010)

3.4.2 OS, 3 références

Listes des chapitres d'ouvrages

- [30] C. MORETTI, X. TAO, L. Koehl, et V. KONCAR, « Electrochromic textile displays for personal communication », in *Smart Textiles and their Applications*, Woodhead Publishing, 2016, p. 539-568.
- [31] X. TAO et V. KONCAR, « Textile electronic circuits based on organic fibrous transistors », in *Smart Textiles and their Applications*, Woodhead Publishing, 2016, p. 569-598.
- [32] K. Liu, X. Zeng, P. Bruniaux, X. Tao, E. Kamalha, et J. Wang, « Garment Fit Evaluation Using Machine Learning Technology », in *Artificial Intelligence for Fashion Industry in the Big Data Era*, S. Thomassey et X. Zeng, Éd. Singapore: Springer, 2018, p. 273-288.

3.4.3 ACLN, 4 références

Liste des articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture non répertoriées dans la base de données Web of Science.

- [33] X. Tao, V. Koncar, C. Dufour, N. Onar, et A. Aksit, « STRUCTURAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF PET NONWOVEN FABRICS COATED WITH PYRROLE/ANILINE COPOLYMERS », *J. Text. Eng.*, vol. 15, p. 72, 2008.
- [34] X. Tao, V. Koncar, C. Dufour, N. Onar, et A. Aksit, « Coating of polyethylene terephthalate nonwoven fabrics with indium zinc oxide solutions at low temperature by sol-gel process », *J. Text. Eng.*, vol. 17, p. 79-1-6, 2010.
- [35] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, D. Coulon, et V. Koncar, « Study on the Measurement Method of Skin Textile Electrodes Contact Impedance », *J. Fash. Technol. Text. Eng.*, vol. 2018, mars 2019, doi: 10.4172/2329-9568.S5-004.
- [36] A. ANKHILLI, S. U. ZAMAN, X. TAO, C. COCHRANE, V. KONCAR, et D. COULON, « Washable embroidered textile electrodes for long-term electrocardiography monitoring », *Text. Leather Rev.*, vol. 2, n° 3, p. 126-135, 2019.

3.4.4 ACT, 21 références

Liste des communications avec actes dans un congrès international ou national

- [37] X. Tao, A. BEURAIN, C. DUFOUR, M. LEWANDOWSKI, et V. KONCAR, « THE STUDY ON ELECTRICAL PROPERTIES OF FIBRES COATED BY SOL-GEL DERIVED INDIUM-TIN-OXIDE UNDER LOW ANNEALING TEMPERATURE », présenté à AUTEX 2008, Biella, Italy, juin 2008.
- [38] X. Tao, V. Koncar, et C. Dufour, « Novel geometry pattern for wire organic electrochemical textile transistor », présenté à 10th World Textile Conference (AUTEX 2010), Vilnius, Lithuania, juin 2010.
- [39] C. Moretti, F. Kelly, V. KONCAR, X. TAO, et L. Koehl, « CONTRIBUTION TO THE CREATION AND COMMAND OF TEXTILE ELECTROCHROMIC DEVICES », présenté à 10th World Textile Conference (AUTEX 2013), Dresden, Germany, mai 2013.
- [40] C. Moretti, X. Tao, V. Koncar, et L. Koehl, « Study on electrical performances of a flexible electrochromic textile device », présenté à International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2013), Roubaix, France, oct. 2013.

- [41] X. Chen, X. Tao, et X. Zeng, « Control and optimization of Human Perception on Virtual Garments by Adjusting Technical Parameters of the Corresponding CAD Software », présenté à Conference on Human Factors in Computing Systems 2014, Toronto, Canada, mai 2014.
- [42] X. Chen, X. Zeng, L. Koehl, X. Tao, et J. Boulenguez-Phippen, « Optimization of Human Perception on Virtual Garments by Modeling the Relation between Fabric Properties and Sensory Descriptors Using Intelligent Techniques », in *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Montpellier, France, juill. 2014, p. 606-615, doi: 10.1007/978-3-319-08855-6_61.
- [43] C. Moretti, V. Koncar, L. Koehl, et X. Tao, « Innovative methodology for electrochromic color change evaluation », présenté à AUTEX 2014, Bursa, Turkey, mai 2014.
- [44] I. Jerkovic *et al.*, « E-GLASS/POLYPROPYLENE SENSOR YARNS DEVELOPED BY ROLL TO ROLL COATING PROCEDURE », présenté à 5th International Conference on Intelligent Textiles & Mass Customisation, Casablanca, Morocco, nov. 2015.
- [45] K. Liu, J. Wang, X. Zeng, X. Tao, et P. Bruniaux, « Garment fit evaluation based on bayesian discriminant », in *Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making*, Roubaix, France, août 2016, vol. Volume 10, p. 990-995, doi: 10.1142/9789813146976_0153.
- [46] K. Liu, J. Wang, X. Zeng, X. Tao, et P. Bruniaux, « Using artificial intelligence to predict human body dimensions for pattern making », in *Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making*, Roubaix, France, août 2016, vol. Volume 10, p. 996-1001, doi: 10.1142/9789813146976_0154.
- [47] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, V. Koncar, et D. Coulon, « Washable and reliable textile electrodes embedded into underwear for ECG monitoring », présenté à International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2017), Ghent, Belgium, oct. 2017, doi: 10.4172/2329-9568.S4-010.
- [48] T.-H. Huang *et al.*, « A Novel Design of E-Textile Integration for Physiological Monitoring and Lighting », présenté à International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2017), Ghent, Belgium, oct. 2017, doi: 10.4172/2329-9568.S4-010.
- [49] D. Matsouka, X. Tao, V. Koncar, S. Vassiliadis, D. Goustouridis, et F. Dassonville, « Towards the washable electronic textile device », présenté à International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2017), Ghent, Belgium, oct. 2017, doi: 10.4172/2329-9568.S4-010.
- [50] S. H. Eryuruk, V. Koncar, F. Kalaoglu, H. Gidik, et X. Tao, « Thermal comfort properties of firefighters' clothing with underwear », in *Thermal comfort properties of firefighters' clothing with underwear*, Lesvos, Greece, sept. 2018, vol. 459, p. 012040, doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012040.
- [51] D. Matsouka *et al.*, « Electrical connection issues on wearable electronics », in *Electrical connection issues on wearable electronics*, Lesvos, Greece, sept. 2018, vol. 459, p. 012017, doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012017.
- [52] S. U. Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Market readiness of smart textile structures - reliability and washability », in *Market readiness of smart textile structures - reliability and washability*, Lesvos, Greece, sept. 2018, vol. 459, p. 012071, doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012071.

[53] K. Wang, X. Zeng, L. Koehl, X. Tao, et Y. Chen, « Statistical based approach for uncertainty analysis in life cycle assessment: a case study in textile industry », in *2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, juin 2019, p. 1-4, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858952.

[54] S. U. Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Development of E-textile electrodes: washability and mechanical stresses », in *Development of E-textile electrodes: washability and mechanical stresses*, Marrakech, Morocco, nov. 2019, vol. 827, p. 012025, doi: 10.1088/1757-899X/827/1/012025.

[55] J. Hao *et al.*, « Embroidered split ring resonator antenna », présenté à 19th World Textile Conference on Textiles, Ghent, Belgium, juin 2019.

[56] K. Wang, X. Zeng, Y. Chen, L. Koehl, et X. Tao, « General architecture and methodology for the development of a traceability information management platform for smart manufacturing: Insights from the textile dyeing industry », in *Developments of Artificial Intelligence Technologies in Computation and Robotics*, Cologne, Germany, juin 2020, vol. Volume 12, p. 573-580, doi: 10.1142/9789811223334_0069.

[57] J. Hao *et al.*, « Antenne textile à motif métamatériau brodé », présenté à Journées Nationales Microondes (JNM 2019), Caen, France, mai 2019.

3.4.5 COM, 1 référence

Liste des communications orales sans acte dans un congrès international ou national.

[58] X. Tao, « Textile electronics », 2020 E-Textiles Europe Virtual Summit, nov. 19, 2020.

3.4.6 AFF, 2 références

Liste des communications par affiche dans un congrès international ou national.

[59] X. Tao, V. Koncar, C. Dufour, et D. Vuillaume, « A new geometry pattern for the wire organic electrochemical textile transistor on a nature fiber », présenté à International Conference on Organic Electronics, ICOE 2010, Paris, 2010, Consulté le: oct. 30, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00574087>.

[60] L. Burgnies *et al.*, « Matériaux conducteurs pour les antennes patches textiles », présenté à XXIèmes Journées Nationales Microondes, Caen, France, mai 2019.

3.4.7 Autres actions, rayonnement

Membre du Comité d'organisation pour les conférences internationales

- FLINS 2016, (Conference on Uncertainty modelling in knowledge engineering and decision making), 24-26 août 2016, ENSAIT, Roubaix, France.
- ITMC 2017, (International conference on Intelligent textiles and Mass customisation), 16-17 Octobre 2017, Ghent Université, Ghent, Belgium.
- « Smart Textiles Salon 2017 », 18 Octobre 2017, Ghent Université, Ghent, Belgium.
- TBIS 2021, (The 14th Textile Bioengineering and Informatics Symposium), 6-9 July, 2021, ENSAIT, Roubaix, France

Membre du Comité de Scientifique pour les conférences internationales.

- ITMC 2017, (International conference on Intelligent textiles and Mass Customisation), 16-17 Octobre 2017, Ghent Université, Ghent, Belgium.
- FTC 2018 (Functional Textiles & Clothing Conference), 09-11 February 2018, New Delhi, India
- SENSORCOMM 2018 (The Twelfth International Conference on Sensor Technologies and Applications), 16-20 September, 2018, Venice, Italy
- ICPS 2019 (IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems), 6-9 May 2019, Taipei, Taiwan
- ITMC 2019, (International conference on Intelligent textiles and Mass Customisation), 13-15 November 2019, Marrakech, Morocco
- TZG 2019 (Textile Science and Economy 2019 French-Croatian Forum), 23-24 January, 2019, Zagreb, Croatian
- ITMC 2021, (International conference on Intelligent textiles and Mass Customisation), 21-23 September, Montreal, Canada
- TBIS 2021, (The 14th Textile Bioengineering and Informatics Symposium), 6-9 July, 2021, ENSAIT, Roubaix, France

Expertises, évaluation

- Rapporteur invité par l'organisme « Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada » pour une application (Title: Development of smart thermoregulated mattresses) pour la bourse « Applied Research and Development (ARD) Grants » (2015)

Rapporteur d'articles scientifiques

Depuis 2012, j'ai effectué des revues d'articles scientifiques (33) pour des journaux, reprises dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Détails des revues scientifiques.

Années	Revue	Titre
2012	IEEE Electron Device Letters	Extensibility limit of Woven Conductive Yarns
2013	International Journal of Clothing Science and Technology.	Virtual manipulation for draping
2013	Textile Research Journal	The Prediction of Sound Absorption Coefficients for Dual-layered Nonwoven Absorbers by using General Regression Neural Network
2017	Flexible and Printed Electronics	Screen printed digital circuits based on vertical organic electrochemical transistors
2017	Textile Research Journal	Robotic Mannequin Formed by Flexible-Belt-Net
2017	Textile Research Journal	Wearing comfort of office clothing: effect of fabric properties and garment fit
2017	Textile Research Journal	Effect of fabric tensile elastic property on cushion stiffness of upholstered seat foundation

2018	Archive of Biomedical Science and Engineering	The QRS complex detection using morphological filtering
2018	Electronics	Towards The Internet of Smart Clothing: A Review on IoT Wearables and Garments for Creating Intelligent Connected E-Textiles
2018	Fibers	Developing novel temperature sensing garments for health monitoring applications
2018	Sensors	An Energy-efficient Algorithm for Wearable Electrocardiogram Signal Processing in Ubiquitous Healthcare Applications
2018	Sensors	Heart Rate Estimated from Body Movements at Six Degrees of Freedom by Convolutional Neural Networks
2018	Sensors	Validation Study of Freezing of Gait(FoG) Detection and Machine Learning based FoG Prediction using Estimated Gait Characteristics with Wearable Accelerometer
2018	Textile Research Journal	A novel wearable flexible sensor device for monitoring breathing condition
2019	ACS Applied Materials & Interfaces	Wettability Control in Tree Structure-Based 1D Fiber Assemblies for Moisture Wicking Functionality
2019	Applied Sciences	Design of A Solar-Powered Portable ECG Device with Optimal Power Consumption and High Accuracy Measurement
2019	Electronics	Arm-ECG wireless sensor system for wearable long-term surveillance of heart arrhythmias
2019	IEEE Sensors	Electronic Textiles and Wearable Technologies: A Review
2019	Sensors	A Multi-Channel Convolutional Neural Network Architecture for the Detection of the State of Mind Using Physiological Signals from Wearable Devices.
2019	Sensors	Review on Smart Electro-Clothing Systems (SeCSs)
2019	Sensors	Context-aware Winter Sports based on Multivariate Sequence Learning
2019	Sensors	Locally LSR over-molding of textile integrated actors and sensors
2019	Sensors	Textile electrocardiogram (ECG) electrodes for wearable health monitoring
2019	Textile Research Journal	The effect of garment combinations on thermal comfort of office clothing
2019	Textile Research Journal	A smart bed fabricated using 3D printed FBG sensors for pressure measurement
2019	Textile Research Journal	Intelligent design and virtual display of complete garment based on three-dimensional design system
2020	Applied Sciences	Hardware Prototype for Wrist-worn Simultaneous Monitoring of Environmental, Behavioral, and Physiological Parameters
2020	Applied Sciences	ECG-signal multi-classification model based on squeeze-and-excitation residual neural networks
2020	IEEE Sensors	Contact ECG Recording Using Copper and E-Textile Based Flexible Dry Electrodes
2020	Sensors	Devices for continuous recording of "integral ECG" for determining vital physiological indicators of a person's state and their use in Bio cybernetic complexes
2020	Sensors	Development of a Pressure Measuring Garment to Continuously Measure the Effects of Compression on the Human Body

2020	Textile Research Journal	Appearance Transfer for the Fabric of Colored Spun Yarn Based on Image Color Transfer
2020	Textile Research Journal	Development, Fabrication and Evaluation of Passive Interface Gloves
2020	Textile Research Journal	Effect of support knee-high socks on leg volume

Autre rayonnement

Depuis 2015, membre du GRAISyHM (Groupe d'intérêt scientifique de Recherche en Automatisation Intégrée et Système Homme-Machine)

Depuis 2018, membre du IPC (Association Connecting Electronics Industries) pour les groupes « E-Textile Test Methods Development and validation subcommittee », « E-textiles committee in Europe », « E-Textiles joining and interconnection techniques subcommittee » et « E-textile Materials subcommittee ».

En 2018, j'ai été le représentant de l'école pour la réunion « World Textile University Alliance » en Chine et j'ai fait une présentation de l'école.

En 2019 et 2020, j'ai été invité à assurer une formation concernant les textiles intelligents pour « Shanghai International Textile Graduate Summer School » à l'université de Donghua, Chine.

Depuis 2020, je suis membre du SAGIP (Société d'Automatique et de Génie Industrielle et de Productique)

En 2020, j'ai été nommé « Guest Editor » pour une session spéciale « Smart Textiles and Applications » pour la revue Sensors.

Depuis 2020, je suis membre de comité de la revue « International Journal of Hybrid Information Technology »

Prix

2019 Prix d'excellence pour la philosophie et les sciences sociales de la province du Shaanxi, Chine

2020 Prix bronze, International Design Contest, Shanghai, Chine

4 Synthèse des activités pédagogiques et encadrement d'étudiants

4.1 Résumé des enseignements

J'ai eu l'opportunité de commencer ma carrière d'enseignant pendant ma thèse de doctorat (2007-2010) en tant que vacataire et moniteur en effectuant des cours magistraux (CM), des travaux dirigés (TD) et des travaux pratiques (TP). Suite à la soutenance de ma thèse de doctorat, les 12 mois passés en tant qu'ATER (2010-2011) à l'ENSAIT m'ont permis de découvrir des domaines d'enseignement variés, notamment dans le domaine de l'automatique et de la confection. Suite à la réforme pédagogique de l'année 2016 à l'ENSAIT, j'ai créé un module de cours « Programmation en Visual Basic Application » et un module de cours « Textiles Intelligents » et « E-Commerce » en collaboration avec d'autres enseignants.

4.1.1 Enseignements effectués durant ma thèse (2007-2010)

Dès ma première année de thèse (2007-2008), j'ai débuté ma carrière d'enseignant avec la « Langue Vivante 2 – Chinois » en prenant le relais d'un autre ATER. Comme ma langue maternelle est le Chinois, la connaissance du contenu enseigné pour ce cours ne m'a pas posé de difficulté particulière. C'était plutôt une opportunité pour découvrir le monde de l'enseignement et le processus d'organisation des cours dans un établissement public. Ce cours était destiné aux élèves en 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} année (E1, E2 et E3) de l'ENSAIT qui allaient participer au semestre international en Chine.

A partir de la deuxième année de ma thèse de doctorat (2008), j'ai commencé à assurer d'autres cours plus technologiques, en tant que moniteur. Pendant cette période, j'ai enseigné les cours de « Textiles intelligents et sensoriels », « Fonctionnalités des textiles innovants » et « Méthodes d'industrialisation » aux élèves de 2^{ème} et de 3^{ème} année d'ingénieur en cursus traditionnel et aux apprentis de 3^{ème} (E2, E3 et A3).

Tableau 5 : Détail des enseignements effectués durant la préparation de ma thèse de doctorat (2007-2010).

Année	Enseignements	Niveau	CM	TD	TP
2007-2008	Langue Vivante Chinois	E1, E2, E3		54	
2008-2009	Langue Vivante Chinois	E2, E3		8	
	Textiles intelligents et sensoriels	E2	4		30
	Fonctionnalités des textiles innovants	E3, A3	12	2	66
	Méthodes d'industrialisation	LP TUT			9
2009-2010	Langue Vivante Chinois	E2, E3		8	
	Textiles intelligents et sensoriels	E2	4		30
	Fonctionnalités des textiles innovants	E3, A3	12	2	66
	Méthodes d'industrialisation	LP TUT			9

4.1.2 Enseignements effectués durant la période « ATER » (2010-2011)

Pendant l'année universitaire 2010-2011, j'ai commencé en tant qu'ATER (Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche) à faire évoluer mes modules d'enseignement vers les thématiques plus générales. J'ai pris le relais d'un autre enseignant dans le domaine de l'automatique pour les modules « Logique combinatoire et séquentielle », « Technologie de l'information » et « Réseau informatique ». Dans le domaine de la logistique textile j'ai participé aux enseignements du module « Logistique » et dans le domaine de la Confection au module « Mass Customisation ».

Ainsi, à partir de 2010 la plupart de mes enseignements se sont situés dans des thématiques correspondant à la section 61 (Génie informatique, automatique et traitement du signal) du Conseil National des Universités (CNU).

De plus, à cette période j'ai commencé à assurer certains cours en anglais pour les élèves étrangers pendant le semestre international (SI).

Tableau 6 : Détails des enseignements effectués en tant que ATER (2010-2011)

Année	Enseignements	Niveau	CM	TD	TP
2010-2011	Logique combinatoire et séquentielle	A1	8	10	
	Logistique textile	E3, A3			36
	Technologie de l'information	E3, A3			36
	Réseaux informatique	E3			27
	Mass Customisation	A3			18
	Textiles intelligents et sensoriels	E2	4		30
	Information System (Anglais)	SI			18
	Advanced Mass Customisation (Anglais)	SI			18
	Fonctionnalités des textiles innovants	E3	4	2	66

4.1.3 Enseignements effectués sur la période 2011-2015

J'ai été nommé Maître de Conférences à l'ENSAIT en 2011 en m'intégrant dans l'équipe de recherche HCD (Human Centred Design) du laboratoire GEMTEX. Mes activités de recherche se situaient essentiellement dans les domaines e-textiles et de la conception de l'interface homme-machine. Mes enseignements n'ont pas beaucoup changé par rapport à ma période ATER. Toutefois, comme l'ENSAIT a développé ses collaborations avec l'éditeur de logiciel de confection, le leader mondial Lectra system, une suite de logiciels contenant les logiciels de patronage « Modaris », les simulateurs de rendus visuels des tissus et tricotés « Kaledo » et le logiciel de CAO « Design Concept 3D » ont été mis à la disposition du département de la confection. Mes enseignements étaient concentrés sur l'utilisation des logiciels « Modaris » pour les modules « Confection Collection » et « Confection Collection 2 » et des outils « Kaledo Weave » et « Kaledo Style » pour la simulation des rendus des tissus et des tricotés.

Tableau 7 : Détails des enseignements effectués en qualité de Maître de Conférences (2011-2015)

Année	Enseignements	Niveau	CM	TD	TP
2011-2012	Logique combinatoire et séquentielle	A1	8	10	
	Confection	E1, A1	8		90
	Confection Collection	E1, A1	8		90
	Découverte Textile	E1		2	
	Mass Customisation	A3			12
	Advanced Mass Customisation (Anglais)	SI			18
2012-2013	Confection Collection	E1, A2, HEFF	9		102
	Confection	A1	4	8	12
	Advanced Mass Customisation (Anglais)	SI			36
2013-2014	Confection	A1			12
	Confection Collection	E1, A2	8		81
	Confection Collection 2	E2	4		72
	Découverte Textile	E1		2	
	Mass Customisation	A3			18

	Advanced Mass Customisation (Anglais)	SI		18	24
2014-2015	Logique combinatoire et séquentielle	E1, A1	12	8	
	Découverte Textile	E1		2	
	Confection	A1			12
	Confection Collection	E1, A2	8		65
	Confection Collection 2	E2	4		
	Mass Customisation	A3			9
	Advanced Mass Customisation (Anglais)	SI			24

4.1.4 Enseignements effectués sur la période 2015-2021

En 2015, l'ENSAIT a entamé une réforme pédagogique ayant pour objectif la volonté de former des ingénieurs plus polyvalents, autonomes et responsables et de les préparer aux métiers et aux technologies de demain. J'ai participé activement à cette réforme par la création des domaines « Textiles intelligents » et « Commerce connecté » pour les élèves ingénieurs en 3^{ème} année ingénieur. De plus, pour répondre aux besoins de nos étudiants, l'école a reformaté les cours du module « Informatique » en ajoutant le cours « Programmation en VBA ».

Pour le domaine des textiles intelligents, j'ai créé un module de cours intitulé « Textile connecté » au sujet des interconnexions entre les composants électroniques et les structures textiles et la programmation sur la plateforme Arduino. Dans le domaine « Commerce connecté », j'enseigne les notions de base de la programmation en PHP pour réaliser les sites web dynamiques (Back Office).

La réforme pédagogique a également abouti à la création d'un nouveau module de formation nommé « Projets Sprint » destiné aux élèves ingénieurs de 3^{ème} année ingénieurs contenant 100 heures de projets sur l'innovation textile. Ces modules « Projets Sprint » s'effectuent par groupe de 4 à 5 élèves ingénieurs. J'ai encadré récemment des Projets Sprint relatifs à l'acquisition des données biomédicales, à la réalisation d'un vêtement lumineux avec des LEDs, des accéléromètres et possédant une carte contrôlée par un microcontrôleur.

Pendant les années universitaires 2019/2020 et 2020/2021, et en raison de la pandémie mondiale de la COVID-19, j'ai contribué à la mise en place des cours dématérialisés et des cours hybrides en développant des modules contenant des vidéos préenregistrées et des échanges avec les élèves en utilisant le campus numérique (Moodle), sous la forme de « Forums ».

Tableau 8 : Détail des enseignements effectués en tant que Maître de Conférences (2015-2021)

Année	Enseignements	Niveau	CM	TD	TP
2015-2016	Logique combinatoire et séquentielle	A1	8	10	
	Confection Collection	E1, A2	8		54
	Confection Collection 2	E2	4		
	Programmation en VBA	E1	2,66	12	
	Mass Customisation	A3			9
	Advanced Mass Customisation (Anglais)	SI			12
2016-2017	Programmation en VBA	E1, A1	2,66	78	
	Confection Collection	E1 A2	5,32		54
	Mass Customisation	A3			9
	Advanced Mass Customisation (Anglais)	SI			24
2017-2018	Programmation en VBA	E1, A1	2,66	78	
	Confection Collection	E1 A2	5,32		54
	Mass Customisation	A3			18
	Advanced Mass Customisation (Anglais)	SI			20
	Commerce connecté	E3	2		9
	Textiles intelligents	E3	1,33		3
	Innovation Design (Anglais)	SI	6		
2018-2019	Programmation en VBA	E1, A1	2,66	84	
	Textiles intelligents	E3	1,33		14,7
	Commerce connecté	E3	4		30
	Confection Collection	E1 A2	5,32		51
	Advanced Mass Customisation (Anglais)	SI			20
2019-2020	Programmation en VBA	E1, A1	2,66	84	
	Textiles intelligents	E3	1,33		10,8
	Technologie de l'information et de la communication	E1, A1		42	
	Confection Collection	E1 A2	5,32		

4.2 Formation continue

L'ENSAIT propose la formation continue en réponse directe à des besoins émanant d'entreprises et pour un public varié (techniciens, ingénieurs, designer, commerciaux, etc.). J'ai ainsi pu transmettre mon expérience dans le domaine de la création de confection par CAO au cours d'un module de formations pour la société Camaïeu (2019). Le programme du module a été défini conjointement avec l'entreprise et s'articulait autour d'une partie de formation sur des logiciels de CAO (3 heures) et de nombreux exemples d'applications (4 heures) permettant d'illustrer les différents concepts.

4.3 Encadrement pédagogique d'étudiants

En tant qu'enseignant-chercheur, l'une de mes missions est d'encadrer les étudiants durant leurs stages de 1^{ère} année (ouvrier / technicien), 2^{ème} année (Assistant ingénieur) et pendant

leurs Projets de Fin d'Études (PFE) en 3^{ème} année d'ingénieur. Le Tableau 9 récapitule les sujets de PFE que j'ai eu sous ma responsabilité depuis 2013.

Tableau 9 : Liste des sujets de PFE.

Année	Nom et Prénom	Entreprise	Sujet
2013	LI Yao	DEVCO	Optimisation de la fonction logistique
2014	JI Kaichen	Curtiss Wright	Analyser, modifier, élaborer un plan de transport pour l'expédition à l'heure précise et lisse
	LACASSIN Priscille	Tribord	Adaptation du conception « Nahia » du maillot de bain femme à la gamme fillette
	TUERGEN Nazila	Tribord	Refonte des formes de maillot femme
	XUE Yufei	Far Eastern Apparel Co. Ltd.	Optimization and management of the production in assembly lines
	YEUNG Julie	Monnier Frères	Analyse et optimisation de la chaine de mise en ligne sur le site MONNIER Frères
	ZHAI Wenqian	Vicomte A.	Elaboration d'une stratégie d'achat pour assurer un bon niveau de performance
2015	JEMAOUI Hajar	Groupe Chantelle	Misen en place et évaluation dun nouvel outil achat et gestion de flux « CLAP »
	PIERSON Hugo	Pierre Balmain	Uniformisation et maintien de la qualité des matières premières
	PLOVIE Nicolas	Melijoe	Amélioration de l'intégration des données fournisseurs
	SHIN Somie	Melijoe	Développement de l'utilisation du logiciel CEGIUD au sein de l'entreprise
2016	FATIMA-EZZAHRA Dwic	Auchan	Analyse et suivi de la mise en place du sourcing matière chaine et trame en Asie
	BENOIT Gautiert	Elis	Amélioration et optimisation de la productivité des tunnels de lavage
	SHI Lingli	Groupe Zannier	Mise en place d'outils pour la mutualisation d'achats
	MAURIZE Loic	Melijoe	Optimisation des coûts de revient de la mise en ligne
	TOUFIQ Sara	Decathlon	Contribution à la standardisation de la production
2017	CHICARD Célia	KIDILIZ Group	Harmonisation des achats par un système d'aide au sourcing
	THOMAS Charlène	IKKS Women	Optimisation des marges de produits dits héritiers IKKS Women
	SEMENCE Manon	Rouje et Swidens	Amélioration des moyens du service de production
	NALI Omayama	Valeo	Amélioration et mise en place des outils de gestion d'approvisionnements
	GUERIN Philomène	CHANEL	Etude de l'optimisation des interactions Industrialisation-Production face aux enjeux de la croissance de la Petite Maroquinerie
2018	GILBERTAS Charles-Guy	SONIA RYKIEL Paris	Optimisation du développement des collections chaine & trame

	SILVESTRE Claire	Grain de Malice	Mise en place d'un outil informatique pour permettre le suivi de la qualité chez Grain de Malice
	GOURARY Nisrine	Décathlon	La réduction de l'impact environnemental lié aux achats des composants
	ZHOU Qingqing	İDKIDS	Mise en place du programme de fidélité OKAİDI/OBAİBI en Chine
	ARLERY Vincent	Décathlon	Amélioration de l'efficacité et de la qualité lors du processus de développement pour le sport coureur débutant
2019	ASGHIR Issame	CGI	Comment baisser les réclamations et mécontentements reçus par le support utilisateurs afin d'améliorer la relation client
	EL GAZI Marouane	Aptar Chavanod	Amélioration du processus de la gestion des pièces de rechanges
	ALVES Ornella	Ami	Optimisation du suivi de développement produit dans le service Chaussures, Maroquinerie et Accessoires
2020	BALANCHE Julie	LANVIN	Optimisation des outils et des process des développements matières et produits
	QUESSARD Martin	Ami	Optimisation du suivi des développements de la collection SS21

L'ENSAIT dispense également une formation par apprentissage. En tant que tuteur pédagogique, mon rôle consiste à accompagner les apprentis tout au long de leur formation et m'assurer que les tâches au sein de l'entreprise correspondent au référentiel de l'ENSAIT. Ainsi, des visites en entreprises sont régulièrement organisées. Depuis 2018, j'encadre les élèves en apprentissage, leur liste est donnée en Tableau 10.

Tableau 10 : Liste des élèves en apprentissage sous ma responsabilité

Année	Nom et Prénom	Entreprise
2018	BOUCHEZ Eva	Décathlon
	LEPRUNIER Pierre	Décathlon
2019	DE GOULAIN Inès	Décathlon
2020	LAGUERRE Alexandra	Uttyarns

5 Synthèse des activités administratives et collectives

5.1 Participation aux instances

5.1.1 Conseil d'Administration de l'ENSAIT

Depuis 2017, je suis membre élu du Conseil d'Administration de l'ENSAIT pour le collège des Maîtres de Conférences. Le conseil d'administration se réunit quatre fois par an.

5.1.2 Conseil du Laboratoire GEMTEX

Depuis 2014, je suis membre élu du Conseil du Laboratoire GEMTEX (CLG) pour le collège des Maîtres de Conférences non HDR. Ce conseil est composé des enseignants-chercheurs titulaires de la HDR et des membres élus par collège, représentant les personnels scientifiques

et techniques. Le CLG se réunit une fois par mois, c'est un outil de management participatif qui aide la direction du laboratoire au pilotage et au bon fonctionnement de la structure.

5.1.3 Conseil de discipline étudiants/personnel

Depuis 2017, je suis membre élu du Conseil de discipline de l'ENSAIT pour le collège des Maîtres de Conférences. Ce conseil se réunit pour discuter sans caractère juridictionnel sur la prononciation des sanctions disciplinaires.

5.2 Participation aux activités de l'école

En 2017 et 2018, j'ai été membre du comité de sélection pour le recrutement du poste de Maître de Conférences Section CNU 61.

Deuxième partie – Travaux sur les textiles électroniques

1 Introduction

Le domaine de recherche concernant les textiles électroniques est en fort développement depuis plusieurs décennies. En faisant une partie des textiles intelligents, les secteurs d'application de ces textiles particuliers sont : le génie civil, l'électronique et microélectronique, l'architecture, le transport terrestre et aéronautique, le domaine médical et paramédical, les sports etc. De plus, avec l'apparition de matériaux polymères conducteurs et semi-conducteurs, les nouveaux développements de composants électroniques flexibles compatibles avec les structures textiles montrent tout le potentiel des textiles électroniques (e-textiles).

Le fil conducteur peut être considéré comme le composant des textiles électroniques le plus simple. Dans un premier temps, un fil métallique simple cousu dans les structures textiles a été utilisé. Ma thèse de doctorat abordait initialement la conception et la réalisation d'un fil conducteur à base de matériaux textiles flexibles. Le développement récent de nouveaux matériaux organiques conducteurs, semi-conducteurs, électrochimiques et électrochromiques permettent la conception de divers capteurs et actionneurs flexibles, d'écrans et afficheurs textiles, de circuits électroniques souples et de divers dispositifs dont les fonctions restent à être imaginées et définies.

La contribution scientifique principale pendant la préparation de ma thèse de doctorat reste la réalisation de transistors électrochimiques fibreux. Divers circuits électroniques utilisant ce transistor ont été réalisés également. Néanmoins, cette nouvelle électronique « textile » et « organique » n'est pas encore mature à l'échelle industrielle. Les raisons en sont multiples : fiabilité et performances souvent insuffisantes et le coût trop souvent prohibitif. Nous avons fabriqué plusieurs prototypes de transistors fibreux. Pour valoriser ces prototypes, nous avons réalisé un circuit « NON-OU » et un amplificateur dans une structure purement textile. D'autres activités sur les textiles électroniques ont permis de préparer des cellules électrochromes souples textiles et d'adapter les moyens de mesures pour caractériser les changements de couleur obtenus. Enfin, une dernière partie de ce chapitre porte sur le développement de capteur textiles d'ECG (Électro Cardio Gramme).

2 Transistors fibreux

2.1 Introduction

Les travaux sur les transistors fibreux ont été réalisés dans le cadre de ma thèse de doctorat. Nous avons réalisé deux types de transistors fibreux : i) transistor fibreux à effet de champ et ii) transistor fibreux électrochimiques. Traditionnellement, les transistors organiques à effet de champ ou électrochimiques se composent de plusieurs couches (diélectrique, semi-conductrice, électrode, électrochimique) sur une surface plane. Cette structure multicouche favorise la fiabilité et la précision durant la production massive. Elle favorise également le processus de miniaturisation. Toutefois, ce type de transistors est difficile à intégrer dans un support souple et flexible tel qu'une structure textile. Ainsi, pendant ma thèse de doctorat j'ai

effectué les études sur la faisabilité et la caractérisation des transistors fibreux utilisant les fils textiles.

2.2 Travaux sur les transistors fibreux organiques à effet de champ

Le transistor fibreux à effet de champ est réalisé sur un fil en inox. La transposition de la mise en œuvre des transistors organiques fibreux à effet de champ classiques, nous a permis de fabriquer des transistors fibreux, en utilisant les mêmes matériaux : le pentacène ayant été utilisé comme matériau semi-conducteur (Figure 1a). Comme la surface courbée de fil inox ne permet pas d'avoir un dépôt homogène, la mobilité moyenne de charges des transistors fibreux est plus faible que celle des transistors organiques sur substrat plan. (Figure 1b) La tension de seuil a aussi été modifiée et décalée dans le sens positif. (Figure 1c) Le procédé de fabrication de ces transistors comprend une phase de dépôt sous vide, ce qui rend difficile leur réalisation en continu en milieu industriel.

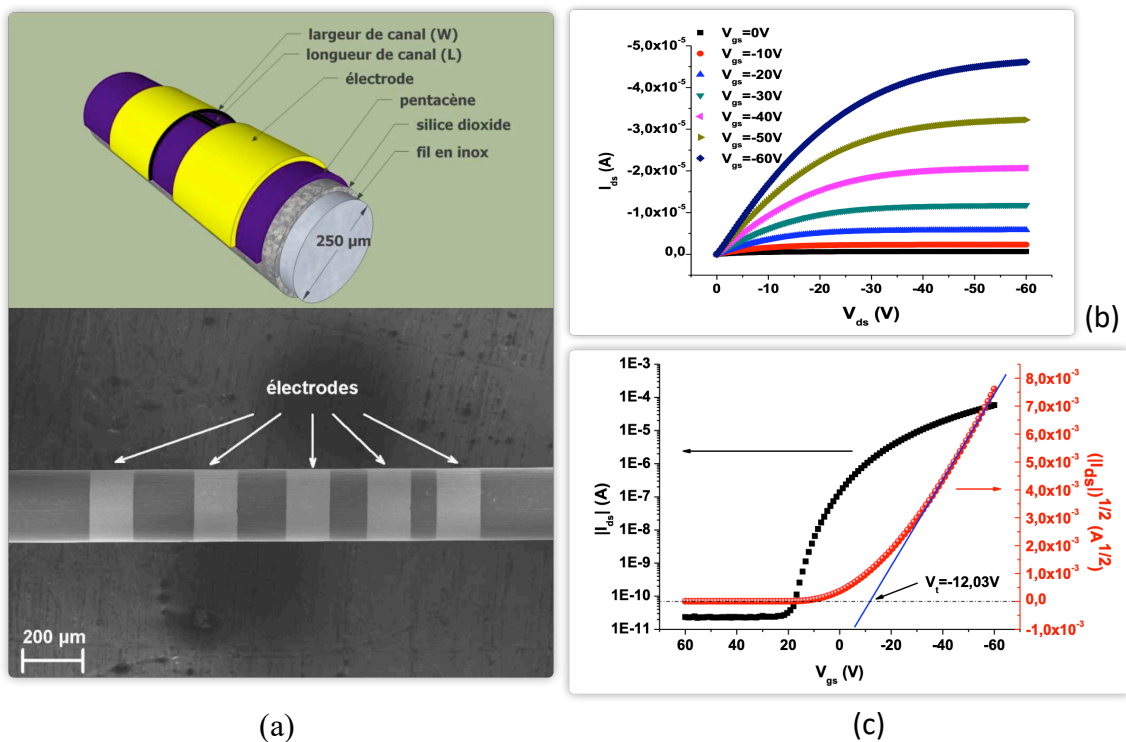


Figure 1 : (a) Configuration du transistor fibreux et image MEB de fil inox métallisé avec le revêtement de pentacène. (b) Caractéristiques des sorties d'un transistor organique fibreux de pentacène. (c) Caractéristique de transfert d'un transistor organique fibreux.

Afin d'éviter ces inconvénients, nous avons utilisé le procédé de « trempage-tirage » par voie liquide pour élaborer des transistors organiques fibreux à effet de champ classiques. Le P3HT RR a été choisi comme matériau semi-conducteur. Les performances de nos transistors présentent une mobilité moyenne des charges d'environ $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ce qui correspond à deux ordres de grandeur en dessous, comparé aux transistors organiques à effet de champ sur wafer, et à une tension de seuil décalée dans le sens positif à cause du rapport et du procédé de recuit.

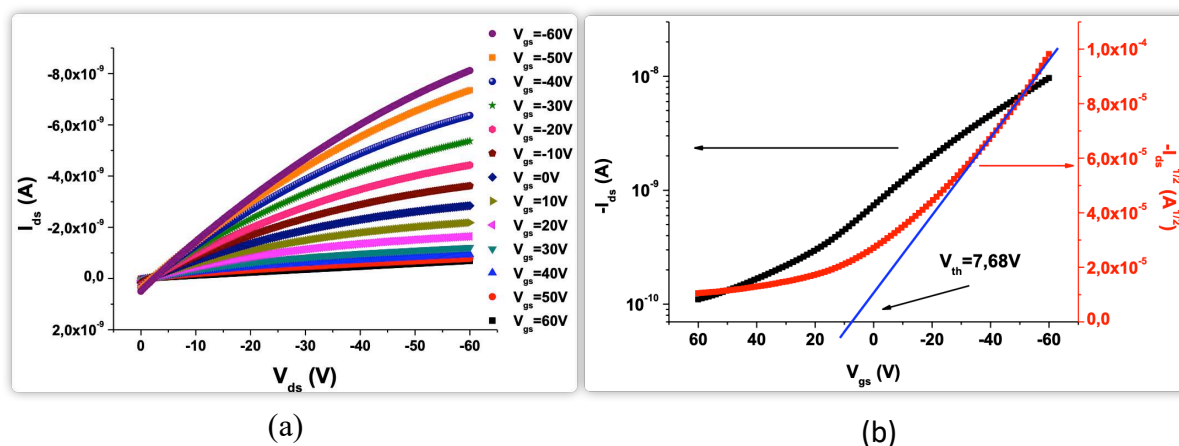


Figure 2 : (a) Caractéristiques de sorties d'un transistor fibreux de P3HT RR. (b) Caractéristiques de transfert d'un transistor fibreux de P3HT RR.

2.3 Travaux sur des transistors fibreux organiques électrochimiques

La réalisation des transistors électrochimiques se décompose en trois phases : i) enduction du fil textile, ii) mise en place de l'électrolyte puis iii) intégration dans un tissu. Dans notre cas, on enduit un fil textile (en Kevlar et en coton) d'une couche de PEDOT:PSS, ensuite, on prépare l'électrolyte et on fabrique les transistors sous deux formes : « croisée » et « ligne parallèle ». (Figure 3)

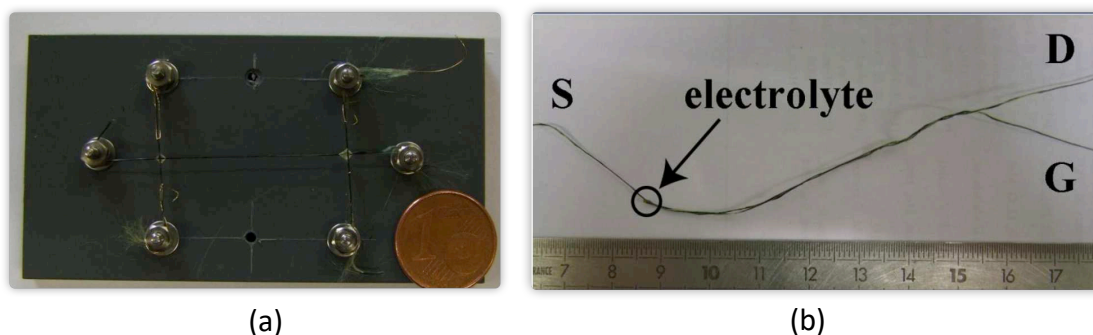


Figure 3 : (a) Photo de transistor fibreux organique électrochimique forme « croisée ». (b) Photo de transistor fibreux organique électrochimique forme « ligne parallèle ».

Comme le canal de transport des électrons est ouvert ou fermé par l'effet de rédox (réduction – oxydation), le résultat de mesures électriques est fortement influencé par la vitesse de mesure. Après avoir testé ces transistors en utilisant plusieurs vitesses de mesures, nous avons obtenu des courbes de sortie et de transfert pour les transistors fibreux organiques sous forme « croisée » et « ligne parallèle » suivante. (Figure 4)

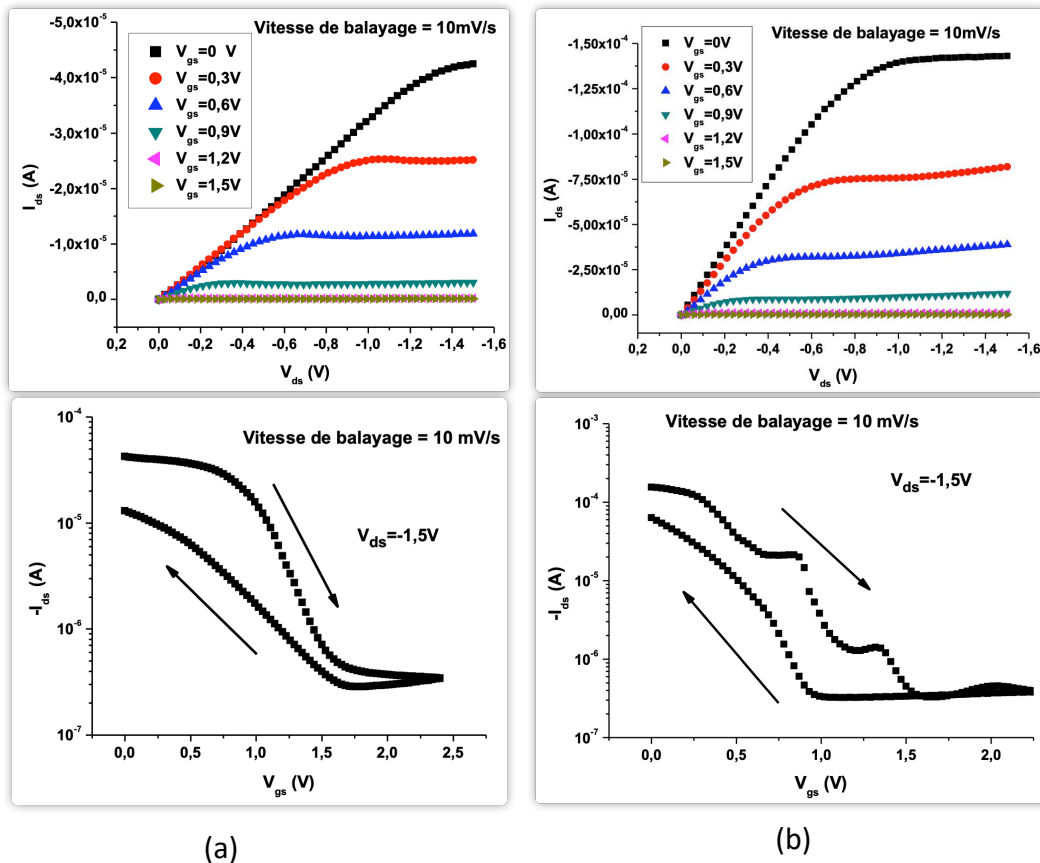


Figure 4 : (a) Caractéristiques de sortie et de transfert d'un transistor organique fibreux électrochromique forme « croisée ». (b) Caractéristiques de sortie et de transfert d'un transistor fibreux organique électrochimique forme « ligne parallèle ».

2.4 Travaux sur les circuits électroniques

Avec les transistors organiques fibreux électrochimiques, nous avons réalisé trois circuits électroniques purement textiles : un inverseur, un circuit « NON-OU » et un amplificateur (Figure 5). Cet inverseur peut être facilement réalisé par combinaison d'un transistor fibreux et d'un fil conducteur d'une solution de noir de carbone. La Figure 6a montre la tension de sortie d'un inverseur textile. Lorsque l'entrée, V_{in} , est égale à 1V, la sortie, V_{out} , est égale à 0V et vice versa. La période des impulsions d'entrée est 200s avec un rapport cyclique de 50%. La dissymétrie de temps de commutation (16s pour « On-to-Off » et 17,5s pour « Off-to-On ») provient du fait que la réaction de réduction de PEDOT:PSS dans le transistor est plus lente que sa réaction d'oxydation. Afin d'étudier le vieillissement des transistors fibreux électrochimiques, nous appliquons des impulsions dont la largeur est d'une durée de 17 heures sur un inverseur formé par un transistor fibreux électrochimique sous forme « croisée ». La caractéristique électrique est présentée sur la Figure 6b. Nous avons constaté que le courant « On » diminue légèrement après 5 heures de mesure et le courant « Off » augmente après 11 heures de mesure. La diminution du courant « On » peut être expliquée par le résidu des cations de l'électrolyte dans le PEDOT:PSS et la photo-dégradation du PEDOT:PSS. La Figure 6c montre la tension de sortie de la porte logique « NON-OU ». On peut constater que la sortie V_{out} , est égale à 1V lorsque les deux entrées sont égales à 0V. Dans tous les autres cas, la sortie est égale à 9V. La Figure 6d représente les caractéristiques d'un circuit

d'amplificateur. On peut constater qu'en sortie on retrouve un signal oscillatoire amplifié de même période avec un gain de tension de 7,5.

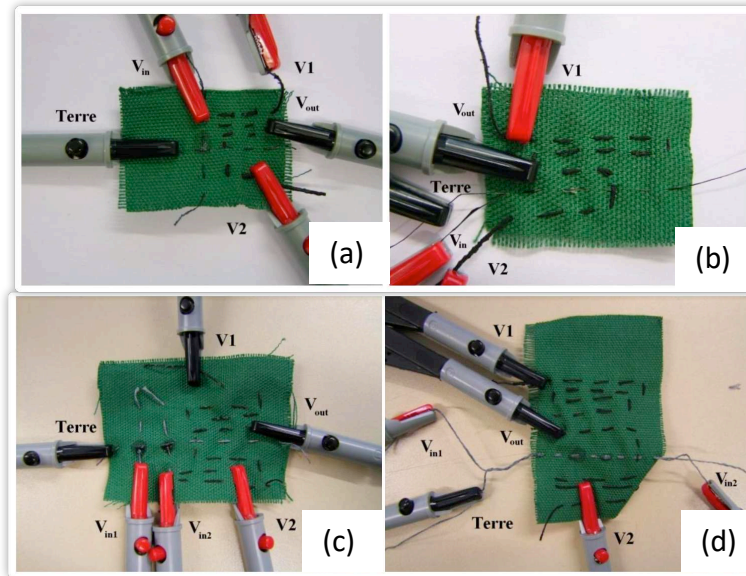


Figure 5 : a) Inverseur réalisé par un transistor fibreux forme « croisée ». (b) Inverseur réalisé par un transistor fibreux forme « ligne parallèle ». (c) Circuit « NON-OU » réalisé par deux transistors fibreux forme « croisée » (d) Circuit « NON-OU » réalisé par deux transistors fibreux forme « ligne parallèle ».

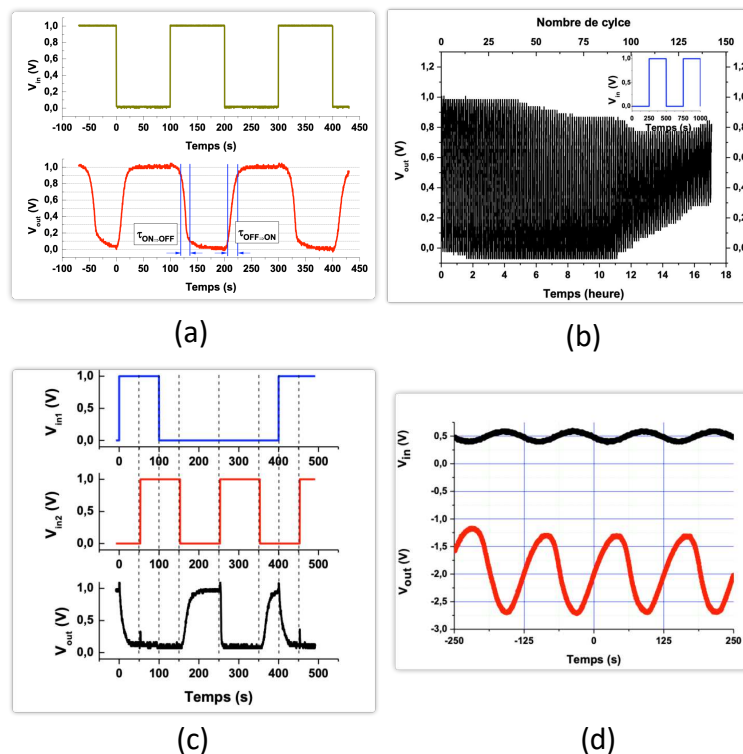


Figure 6 : (a) Courbe de sortie d'un inverseur. (b) Courbe de sortie d'un circuit d'inverseur à l'excitation d'un pulse pendant 17 heures. (c) Courbe de sortie d'un circuit « NON-OU » à l'excitation de deux pulses. (d) Caractéristique d'un circuit électrique d'amplificateur.

Les travaux sur les circuits électroniques textiles démontrent la possibilité de développement de circuit à base de composants électroniques textiles réalisées par les transistors fibreux électrochimiques. Bien que le temps de commutations soit faible par rapport aux transistors traditionnels à base de silicium, il est possible d'utiliser ces matériaux pour réaliser les capteurs et les actionneurs [61]. Dans la section suivante, nous avons utilisé le PEDOT:PSS pour réaliser les afficheurs textiles.

3 Textiles électrochromes pour les cellules d'afficheur textile

3.1 Introduction

Les matériaux électrochromiques ont la capacité de changer leurs propriétés optiques en fonction d'un stimulus électrique. Le type de stimulus provoquant le changement de couleur détermine le nom du matériau. Le changement de leurs propriétés optiques peut se produire dans le spectre de la couleur visible comme dans celui des infrarouges, des ultraviolets ou des microondes. Un passage d'une couleur à une autre, tout comme d'un état coloré à un état transparent, peut être observé.

Les composés électrochromes sont des matériaux dont les propriétés optiques changent réversiblement lorsqu'on leur applique une différence de potentiel électrique. Le changement de couleur est lié aux différents états d'oxydation des molécules et des spectres d'absorption qui y sont liés [62]. Les premiers travaux sur ces matériaux sont anciens mais c'est dans les années 60 que les investigations pour une exploitation industrielle ont débuté [63]. La structure traditionnelle pour une cellule électrochrome contient 7 couches (Figure 7) et la durée de vie du système est largement augmentée si les couches centrales sont stables dimensionnellement, protégées de l'eau, de l'oxygène etc. Ainsi, les systèmes dont les composés actifs sont placés entre deux substrats de verres sont privilégiés. Kline et al. ont publié en 2014 un article offrant un panorama assez complet des structures électrochromes utilisant des matériaux textiles développés au cours de la dernière décennie [64].

Les travaux menés dans le cadre de la thèse de Constance MORETTI pour le projet HomoTextilus (ANR) et du Post-Doc de Amarish DUBEY pour le projet LITEVA (FUI) ont permis de développer une structure électrochrome à base de PEDOT:PSS enduit sur tissu et sur fil. Dans les études menées à l'ENSAIT et résumées ci-après, l'accent a été mis sur (i) des nouvelles structures électrochromes textiles en réduisant le nombre de couches, (ii) l'optimisation de la durée de vie de celles-ci, et (iii) le développement d'une structure électrochrome à base de fil enduit.

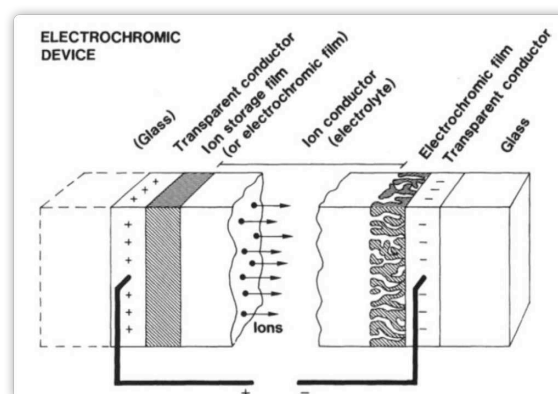


Figure 7 : Structure traditionnelle d'une cellule électrochrome.

3.2 Cellules électrochromes à base de tissu enduit par le PEDOT:PSS

Les premiers travaux menés sur le développement de cellule à base de PEDOT:PSS ont été réalisés dans le cadre du projet collaboratif Intellitex [65], [66]. Parmi les avancées significatives du projet Intellitex, une structure électrochrome à base de textile a été créée. La structure développée durant ce projet par Ludivine MEUNIER et al. a permis de passer de sept couches rigides à cinq couches flexibles, comme le montre la Figure 8a. Deux films de PET enduits d'ITO sont choisis comme anode et cathode. Une étoffe textile est placée entre ces deux électrodes (Figure 8b). Celle-ci sert avant tout à éviter le contact entre les deux électrodes et le support mécanique de la structure, en plus des films PET. Enfin, elle joue le rôle de couche de stockage pour l'électrolyte et le matériaux électrochrome. Différents matériaux textiles ont été testés, notamment un non-tissé de polyester et un non-tissé de viscose. Différents matériaux, inorganiques et organiques, sont également employés comme le composé électrochromes.

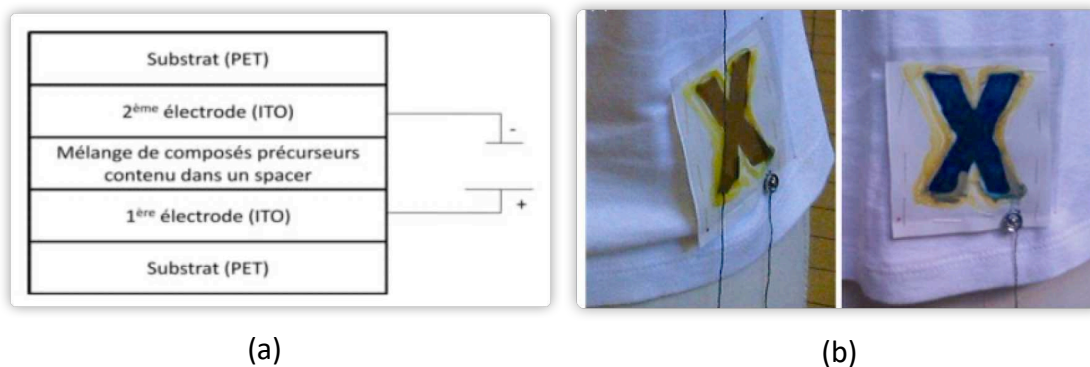


Figure 8 : (a) Structure électrochrome à base textile formée de cinq couches. (b) Prototypes de T-shirt communicant comprenant un afficheur électrochrome.

Le développement et l'étude de cette structure ont ensuite été poursuivis durant la thèse de Constance MORETTI. Ses travaux portent sur l'étude colorimétrique du changement de couleur, le test de plusieurs « spacers » textiles, l'enduction de plusieurs supports textiles à l'aide de PEDOT:PSS, le développement d'une structure extensible, le test de plusieurs électrolytes, la quantification du temps de coloration ainsi que sur le vieillissement de cette structure.

3.2.1 Développement d'une structure électrochrome à base de trois couches

La structure est composée de deux textiles électrochromes conducteurs et d'un textile servant de couche de stockage. Des électrodes permettent l'application du courant électrique. Contrairement aux structures développées dans le projet Intellitex, il n'est pas nécessaire que ces électrodes recouvrent l'intégralité de la surface de la structure électrochrome. Une structure composée de trois couches seulement est ainsi obtenue. (Figure 9) Les électrodes d'ITO sont remplacées par une encre d'argent. Cette électrode n'a pas besoin de recouvrir l'ensemble de la surface, un point suffit, au contact avec le textile électrochrome conducteur.

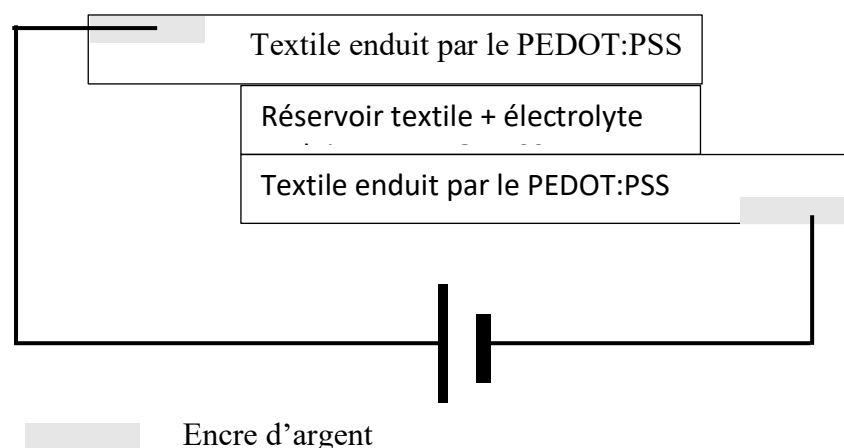


Figure 9 : Structure électrochrome à base de trois couches.

Le composé électrochrome n'est pas mélangé à l'électrolyte, il est appliqué ultérieurement au support textile et s'en imprègne directement. Le composé électrochrome utilisé est le PEDOT:PSS. Un textile intrinsèquement électrochrome est ainsi obtenu, passant du gris clair à l'état oxydé (dopé) au bleu foncé à l'état réduit (neutre). Ce textile électrochrome a un double rôle : il change de couleur, grâce aux propriétés d'électrochromisme du PEDOT:PSS et il conduit l'électricité sur l'ensemble de la surface de la structure. Le textile imprégné de PEDOT:PSS remplit donc à la fois la fonction d'électrode et du composé électrochrome. Deux épaisseurs de ce textile électrochrome sont disposées de part et d'autre d'un support textile, ayant à la fois des fonctions de réservoir, de barrière physique et de contrastant.

Avant tout, ce support textile sert de réservoir à l'électrolyte. Par ailleurs, il empêche tout contact entre les deux tissus électrochromes et évite qu'il ne se produise un court-circuit. Enfin, il est opaque et permet ainsi un meilleur contraste et une meilleure visibilité lors du changement de couleur. Plusieurs types de matériaux textiles sont testés : d'une part la même toile de coton blanche que celle qui a été précédemment employée et d'autre part un non-tissé de viscose. L'électrolyte liquide, photo-polymérisable pour former un sol-gel convient pour cette structure.

La Figure 10a montre un exemple du développement de la structure électrochrome entièrement textile aux états oxydé (gauche) et réduit (droite). La structure textile est très flexible, comme le montre la Figure 10b. Elle est facilement déformable, froissable et enroulable sur elle-même. Cependant, une fois imprégnée d'électrolyte à l'état de sol-gel, cette flexibilité diminue. L'électrolyte sol-gel permet d'offrir une certaine cohérence mécanique des différentes couches en les maintenant par capillarité. Néanmoins, dans le but de pouvoir intégrer cette structure au sein de produits textiles, il est nécessaire de fixer les différentes épaisseurs entre elles. Les épaisseurs la composant peuvent donc aisément être cousues, comme le montre la Figure 10c.

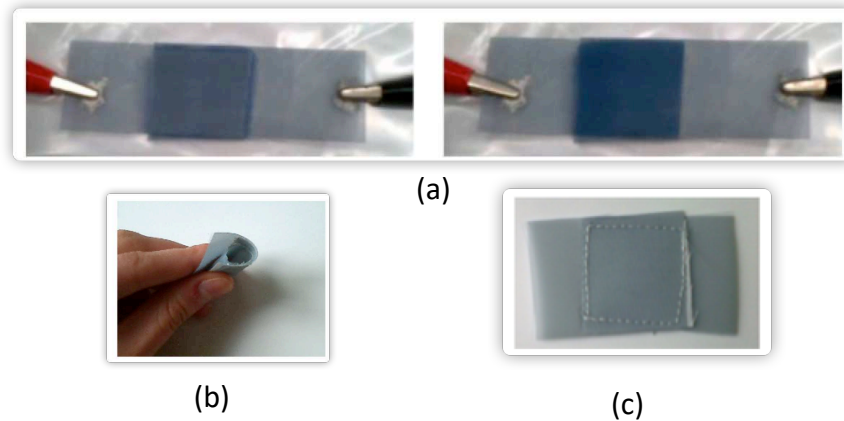


Figure 10 : (a) Échantillon d'une structure électrochrome à base de trois couches. (b) Flexibilité de la structure électrochrome. (c) Échantillon d'une structure électrochrome cousue.

3.2.2 Afficheur électrochrome intégralement textile à plusieurs pixels

La structure électrochrome à base de trois couches ouvre de nouvelles possibilités de design, notamment sur le plan du développement d'afficheurs électrochromes flexibles entièrement textiles composés de plusieurs pixels. Ces pixels ne sont pas obligatoirement carrés ou rectangulaires, mais peuvent prendre des formes très diverses. La Figure 11a montre des exemples d'afficheur électrochrome textile de quatrième génération à quatre pixels triangulaires. Seize configurations sont possibles avec ces quatre pixels, y compris un écran entièrement bleu (réduit) ou entièrement gris (oxydé). Il est possible d'assimiler un pixel bleu à un pixel « allumé » et un pixel gris à un pixel « éteint ». Le pixel est réduit, c'est-à-dire allumé, lorsqu'il est connecté à la cathode (pôle négatif) de la source de tension l'alimentant. Il est éteint, c'est-à-dire oxydé, lorsqu'il est connecté à l'anode (pôle positif).

La Figure 11b donne des exemples de configurations d'un écran de sept segments. Tous les chiffres de 0 à 9 peuvent être affichés sur le prototype. La structure est composée d'une électrode électrochrome commune à tout l'écran et de sept électrodes électrochromes commandées indépendamment et délimitant les sept segments. Les électrodes supérieures sont découpées manuellement à la forme voulue. Sur chaque électrode, à savoir l'électrode inférieure commune comme les électrodes supérieures indépendantes, une électrode d'encre d'argent est appliquée. Un fil d'innox est fixé à l'électrode par l'encre d'argent. Une languette est prévue pour placer l'électrode d'argent et le fil d'innox sur chacune des électrodes électrochromes.

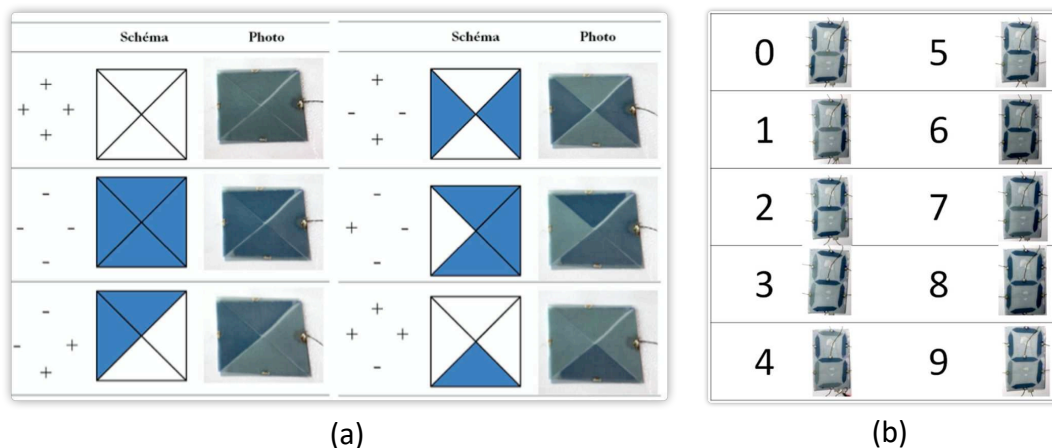


Figure 11 : (a)Exemple de réalisation des configurations avec un afficheur à quatre pixels triangulaires. (b) Chiffres obtenus de 0 à 9 sur un afficheur sept segments réalisé avec une structure électrochrome à base de trois couches.

3.3 Cellules électrochromes à base de fil enduit par le PEDOT:PSS

3.3.1 Fabrication des cellules électrochrome à base de fil enduit

Pendant le projet FUI LITEVA, nous avons essayé de réaliser des cellules électrochromes avec les fils enduits par le PEDOT:PSS. Le processus d'enduction a eu lieu dans le laboratoire de notre partenaire du projet (Entreprise Moulinage du Solier) en utilisant une ligne d'enduction continue. (Figure 12) Le tissu a été ensuite fabriqué en tissant les fils enduits. Ce tissu électrochrome sert de première couche dans une structure de cellule électrochrome à base de trois couches. (Figure 13a) Une membrane semi-perméable est utilisée pour la restriction de mouvements des électrons dans un sol-gel à base de H_3PO_4 . La couche inférieure est une feuille en aluminium.

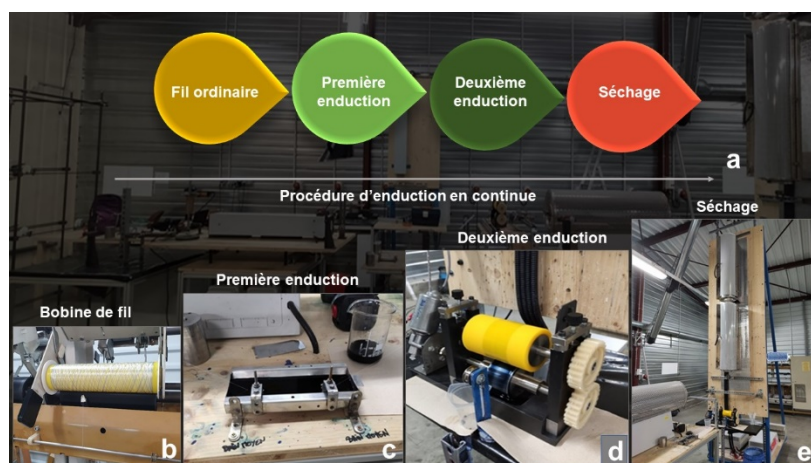


Figure 12 : Ligne d'enduction continue. (a) Le procédé d'enduction. (b) Bobine de fil nul (c) Première phase d'enduction (d) Deuxième phase d'enduction (e) Four tubulaire sur 2 mètres à la température de 180°C.

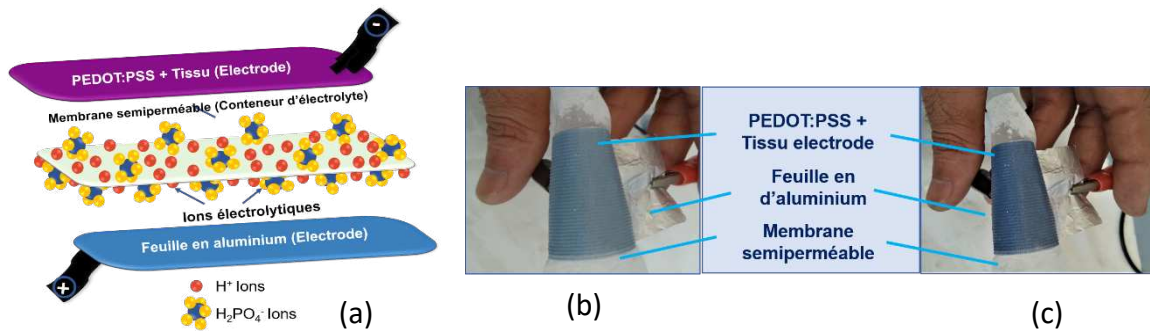


Figure 13 : (a) Structure de cellule électrochrome à base de trois couches. (b) État réduit (c) État oxydé.

Nous avons testé quatre types de fil (polyester lavé, polyester sans lavage, polyester texturé et polyamide). Pour la solution d'enduction, nous avons testé trois rapports de dilution : 1,5, 2 et 2,5. Il a été observé que sur ces douze combinaisons, deux d'entre elles présentaient l'effet de l'électrochromisme préminent. Ce sont les fils en polyester texturé et en polyamide enduit par la solution avec le rapport 1,5 fois de dilution.

L'analyse utilisant le voltamètre cyclique est utilisée pour tester le mécanisme de fonctionnement d'électrochromisme. La Figure 14a montre les performances de voltamètre cyclique sur une tension avec la plage de -2V à 2V à différentes vitesses de balayage allant de 10mV/sec à 500mV/sec. Sur la Figure 14b, deux pics d'oxydation à 0,3V et 1,2V et deux pics de réduction à 0,1V et 1,5V peuvent être observés. Une performance stable de cellule électrochrome est constatée après 2500 cycles d'analyse. (Figure 14c) Le niveau de cette stabilité peut être déterminé par un calcul de rétention de capacité spécifique selon l'Équation 1.

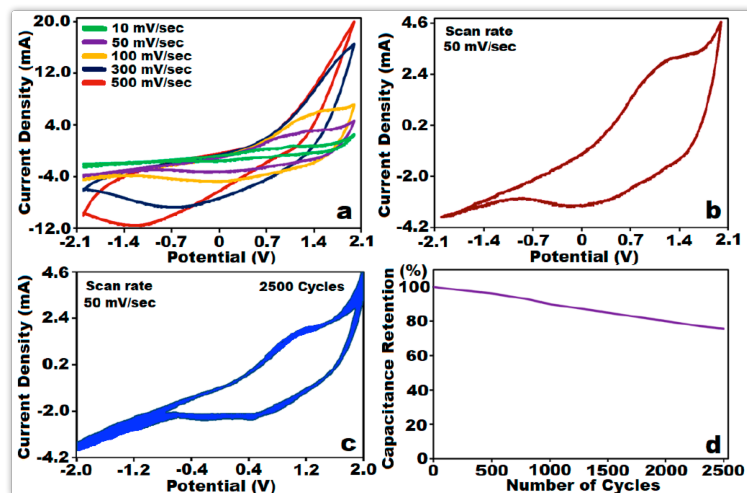


Figure 14 : Résultat de test de voltamètre cyclique. (a) Opération de voltamètre cyclique de -2V à 2V avec la vitesse de balayage de 10mV/sec à 500 MV/sec. (b) Analyse de voltamètre cyclique à la vitesse de balayage 50mV/sec. (c) Analyse de stabilité pour 2500 cycles d'analyse à la vitesse de balayage de 50mV. (d) Étude de stabilité traçant le pourcentage de rétention de capacité spécifique sur le nombre de cycles.

$$C_s = \int \frac{I(u)dt}{m} \times v \times \Delta V \quad \text{Équation 1}$$

où $I(u)$ est l'intensité du courant (A), m est la masse de matériau électrochromique (grammes), v est la vitesse de balayage (mV/sec), t est le temps (sec), ΔV est l'intervalle des tensions appliquées (V).

3.3.2 Tester les cellules par essai de pliage

Afin de montrer la flexibilité de la cellule électrochrome, un test sur un appareil d'essai de pliage hydraulique fabriqué dans notre laboratoire a été mené. (Figure 15) Les cellules électrochromes sont testées par deux méthodes : 1) essai de pliage avant l'assemblage de cellule électrochrome 2) essai de pliage après l'assemblage de cellule électrochrome. Le nombre de pliage est de 1000 cycles et 1500 cycles. A part quelques traces de plis, il n'y a pas de différence visible sur les couleurs à l'état réduit et oxydé entre les échantillons avant ou après l'essai de pliage.

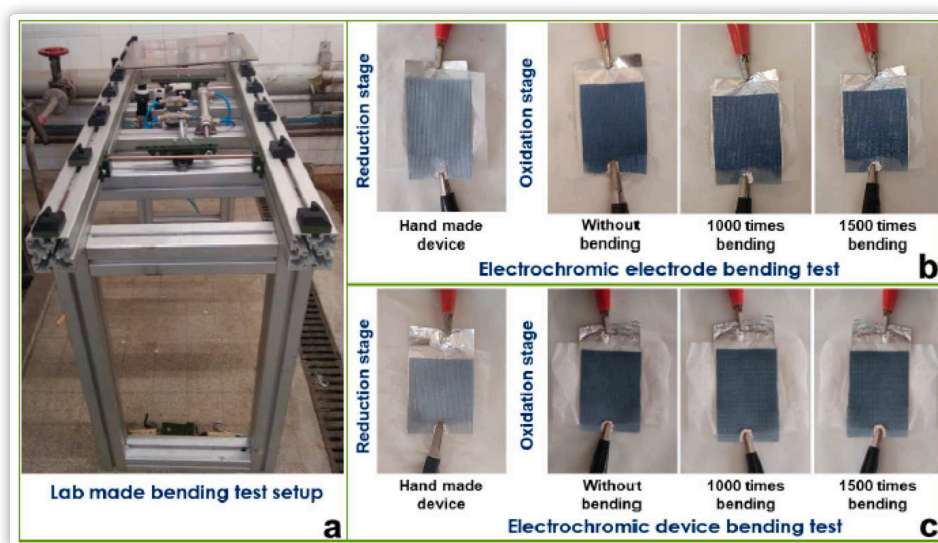


Figure 15 : (a) Photo de l'appareil d'essai de pliage hydraulique. (b) Résultat des cellules électrochromes testées par la première méthode. (c) Résultat des cellules électrochromes testées par la deuxième méthode.

3.4 Étude de vieillissement de cellules électrochromes

Pour pouvoir prétendre à une utilisation industrielle, les cellules électrochromes doivent présenter en plus d'un contraste entre les couleurs en l'état réduit et oxydé et un temps de changement de couleur court, une bonne stabilité temporelle et un nombre de cycle de changement de couleurs élevé [67]. La courte durée de vie des structures électrochromes est le principal obstacle s'opposant à une plus large utilisation. Les avantages considérables de l'électrochromisme, notamment sa large palette de couleurs, sa faible consommation électrique et son changement de couleur visible sous tout angle de vue, pourraient lui permettre d'être compétitif par rapport aux autres technologies d'écrans et afficheurs souples, notamment les OLED. Cependant, la durée de vie des structures électrochromes est encore trop brève comparée à celle des technologies existantes. [68], [69]. Pour permettre l'usage commercial de l'électrochromisme, les structures électrochromes devraient pouvoir fonctionner pendant plusieurs milliers d'heures, de manière continue ou discontinue.

Ainsi, il apparaît indispensable de définir une méthode de mesure et d'analyse claire et standardisée. Il n'existe toutefois actuellement aucune méthode standardisée pour la mesure du vieillissement des structures électrochromes textiles [64], [70].

Initialement, nous avons utilisé un spectrophotomètre pour mesurer la couleur d'un matériau textile. Pourtant, cette méthode présente plusieurs inconvénients qui l'empêchent d'être choisie comme la norme de mesure de la variation de couleur d'une structure électrochrome. Premièrement, durant une mesure spectrophotométrique, l'échantillon à mesurer est caché à la vue de l'observateur. Aucun contrôle visuel par l'expérimentateur n'est possible. Deuxièmement, la taille de la zone à mesurer est prédéfinie et limitée par le diamètre du diaphragme de mesure. Différentes tailles sont disponibles selon le modèle du spectrophotomètre, mais il n'est pas possible de modifier l'ouverture du diaphragme en cours de mesure. Le système de calcul du spectrophotomètre évalue la couleur moyenne de la zone mesurée. En conséquence, et il s'agit du troisième inconvénient identifié, dans le cas où certains points de la zone de mesure présenteraient des défauts, le spectrophotomètre ne permet pas à l'observateur de les constater durant la mesure et ne les prend pas en compte dans le calcul de la couleur. Quatrièmement, l'échantillon est placé en contact avec le spectrophotomètre, ce qui risque d'influencer les réactions physiques et chimiques de la structure. Cinquièmement, la fréquence de mesure du spectrophotomètre disponible et utilisé au laboratoire (DataColor SF600 Plus) a une fréquence de mesure limitée à 0,2 Hz, ce qui ne permet pas de quantifier de manière rigoureuse un changement de couleur électrochrome se produisant en quelques secondes.

3.4.1 Nouvelle méthode pour mesurer le vieillissement de cellule électrochrome et l'homogénéité de la couleur

Afin de résoudre ces problèmes, une nouvelle méthode automatique de mesure dynamique de couleur, spécialement conçue pour les structures textiles électrochromes, a été créée. Cette méthode comprend une caméra (Logitech HD C310), placée au-dessus de l'échantillon électrochrome textile et maintenue grâce à un pied. Cette caméra est reliée à un ordinateur et à un logiciel d'acquisition d'images spécialement développé pour cette méthode de mesure. L'ensemble du système est placé sous une lumière D65, équivalente à la lumière du jour, dans un caisson lumineux (VeriVide CAC 60). Ce système présente l'avantage d'être plus proche des conditions d'utilisation réelles ainsi que de la perception humaine. La Figure 16 montre le système de mesure développé. La caméra pilotée par un programme sous C++ permet de prendre des photos à une fréquence maximale de 30 Hz.

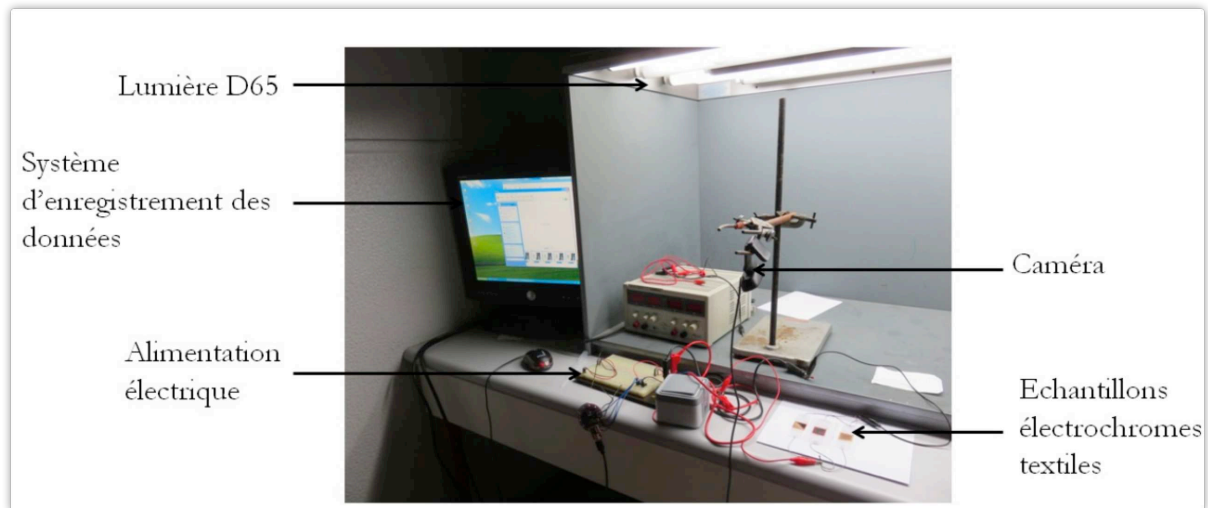


Figure 16 : Photo du système de mesure de couleur utilisant une caméra.

Les images ainsi obtenues sont traitées grâce à un programme développé sous Matlab. Celui-ci permet de découper les images au format voulu, afin de ne conserver que la zone colorée de la structure électrochrome textile. Les zones présentant des défauts peuvent être exclues du calcul de la couleur ou leur influence sur la couleur moyenne peut être observée. La taille et la forme de l'image découpée sont choisies par l'expérimentateur, ce qui permet d'analyser soit la couleur de l'ensemble de la structure, soit une petite partie, soit un nombre de pixels choisis aléatoirement. Une fois l'image à analyser choisie, le programme calcule les coordonnées RVB moyennes de l'image. Ces coordonnées RVB sont ensuite converties en coordonnées CIE $L^*a^*b^*$. Pour la conversion, le point blanc de référence est choisi comme correspondant à la lumière D65, soit : $X_n = 95,047$; $Y_n = 100$; $Z_n = 108,883$.

Ce système de mesure permet à l'expérimentateur de contrôler visuellement le déroulement de la mesure. Il autorise la mesure de différentes tailles d'échantillons et permet d'effectuer l'analyse sur différentes sélections de celui-ci. Il facilite l'identification des éventuels défauts de la structure, durant la mesure ou durant l'analyse. Ce système de mesure est sans contact et ne risque pas d'influencer le comportement de la structure électrochrome. Les mesures peuvent être effectuées à une fréquence relativement élevée adaptée aux changements de couleur rapides. Dans notre cas, la caméra prend 30 images par seconde.

L'écart de couleur entre l'état oxydé et l'état réduit est ensuite calculé. La structure électrochrome est considérée comme vieillie si la valeur ΔE CIE $L^*a^*b^*$ devient inférieure à 10. [71] La durée de vie d'une structure est donc considérée comme le temps avant que l'écart de couleur entre l'état oxydé et l'état réduit de la structure atteigne cette limite de visibilité de ΔE CIE $L^*a^*b^* = 10$.

3.4.2 Étude de durée de vie de structures électrochromes à base textile

De nombreux paramètres peuvent varier lors de la fabrication et de l'utilisation de la structure. Dans le but de limiter le nombre de paramètres influents à étudier, toutes les conditions expérimentales sont gardées constantes, dans la mesure du possible, sauf trois : la tension appliquée, le temps d'application de la tension et les interactions avec l'air et l'humidité ambiante. Afin de limiter le nombre de tests, nous utilisons la méthode de Taguchi. Seulement neuf configurations sont conservées, comme le montre Tableau 11. Pour chaque test, 20 échantillons sont réalisés.

Tableau 11 : Plan d'expérience Taguchi pour l'étude de durée de vie.

Numéro de test	Période d'application de tension	Tension	Protection
1	3s	1,5V	Silicone
2	3s	3V	Sans
3	3s	5V	Film adhésif
4	10s	1,5V	Film adhésif
5	10s	3V	Silicone
6	10	5V	Sans
7	30s	1,5V	Sans
8	30s	3V	Film adhésif
9	30s	5V	Silicone

La Figure 17 montre le premier résultat pour chacune des configurations testées. Ce résultat atteste d'une grande variabilité s'étendant de 3% à 72%. En conséquence, la première conclusion qui peut être apportée à cette étude est que les trois paramètres étudiés ne suffisent pas à décrire le vieillissement d'une structure électrochrome textile. D'autres paramètres, non pris en compte dans cette première étude, sont également importants et influent sur ce phénomène de vieillissement. De ce fait, les durées de vie indiquées ne peuvent que fournir un ordre de grandeur. Malgré tout, les résultats sont suffisamment distincts les uns des autres, en fonction des différentes configurations, pour que plusieurs observations et conclusions puissent d'ores et déjà être apportées. Plusieurs tendances peuvent être distinguées. Premièrement, il est observé qu'une tension élevée appliquée pendant un temps long réduit considérablement la durée de vie de la structure. Une tension faible appliquée pendant un temps court ne permet pas non plus à la structure électrochrome d'avoir une longue durée de vie. Par ailleurs, une certaine similarité de comportement peut être observée, en termes de nombre de cycles, entre les structures soumises à une tension faible appliquée pendant un temps long, celles soumises à une tension élevée appliquée pendant un temps court et celles soumises à une tension moyenne appliquée pendant un temps moyen. Il peut être conclu, en conséquence, que la tension et la durée d'application de cette tension sont des paramètres interdépendants qui ne doivent pas être étudiés indépendamment, mais dont les effets sur le vieillissement des structures électrochromes doivent être étudiés ensemble.

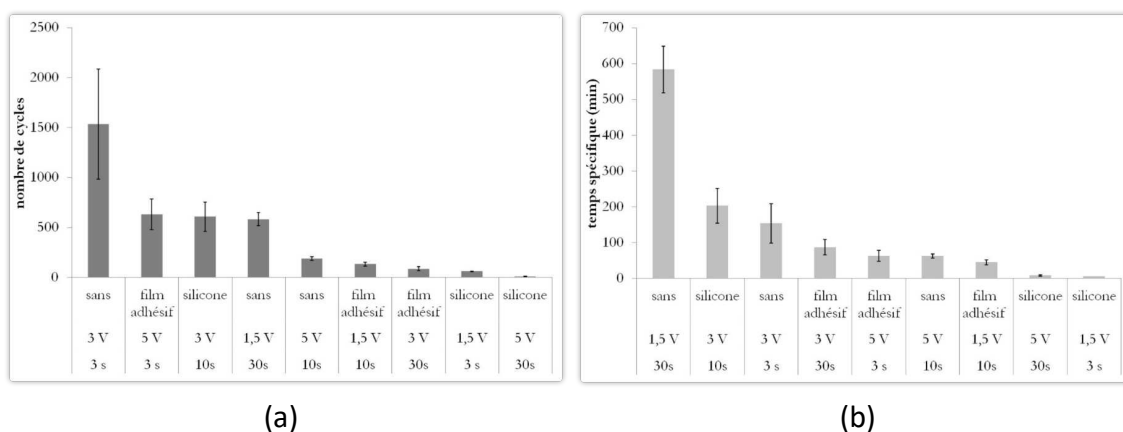


Figure 17 : Durées de vie moyennes et écarts-types des structures électrochromes testées, classées par ordre décroissant. (a) en nombre de cycles (b) en temps.

3.4.3 Modèle de comportement du vieillissement

La Figure 18 présente l'évolution de l'écart de couleur ΔE entre deux états (oxydé et réduit) de chaque cycle en fonction du temps. Cette évolution semble pouvoir être décrite par une fonction exponentielle décroissante du premier ordre de la forme Équation 2.

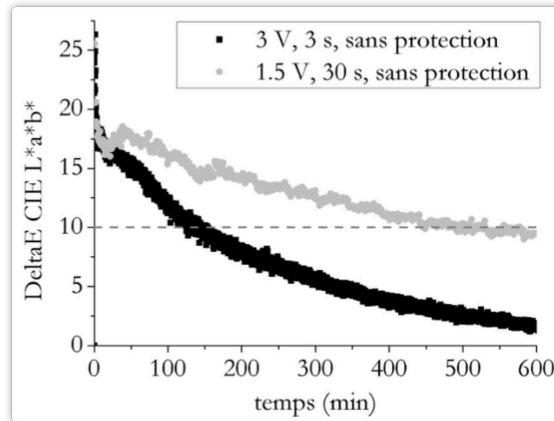


Figure 18 : Évolution de l'écart de couleur ΔE entre les états oxydé et réduit, en fonction du temps.

$$\Delta E(t) = \Delta E_f + \Delta E_{i-f} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{Équation 2}$$

où ΔE_f correspond à la valeur finale de ΔE CIE $L^*a^*b^*$, ΔE_{i-f} correspond à la différence entre la valeur initiale et la valeur finale de ΔE CIE $L^*a^*b^*$, c'est-à-dire à la perte d'écart de couleur. La valeur τ représente la constante de temps. Le Tableau 12 représente les valeurs moyennes obtenues pour chacune de ces trois valeurs ainsi que le coefficient de détermination R^2 . Nous constatons que, dans la plupart des cas, un coefficient de détermination supérieur à 0,92 est obtenu suite aux régressions exponentielles effectuées, signe que le modèle exponentiel développé décrit de manière satisfaisante la variation de ΔE CIE $L^*a^*b^*$ en fonction du temps. La seule exception est obtenue lors de l'application de 1,5 V pendant 3 secondes, sauf pour le test 1. Pour ce dernier, son coefficient de détermination est alors de 0,58 seulement. Ceci est probablement lié aux irrégularités de la variation de ΔE CIE $L^*a^*b^*$ dans cette configuration.

Tableau 12 : Constantes du modèle exponentiel descriptif de l'évolution de l'écart de couleur en fonction du temps, déterminées par régression exponentielle et le classement des configurations testées.

Numéro	Période d'application de tension	Tension	Protection	ΔE_f	ΔE_{i-f}	τ	R^2	Classement en fonction du nombre de cycles	Classement en fonction du temps	Classement moyen
1	3s	1,5V	Silicone	5,53	2,95	82,70	0,58	8	9	8,5
2	3s	3V	Sans	1,08	17,01	364,49	0,97	1	3	2
3	3s	5V	Film	1,95	17,65	68,36	0,94	2	5	3,5
4	10s	1,5V	Film	6,32	9,07	53,56	0,93	6	7	6,5
5	10s	3V	Silicone	3,11	22	140,51	0,96	3	2	2,5
6	10	5V	Sans	9,25	24	12,83	0,96	5	6	5,5
7	30s	1,5V	Sans	7,65	22,15	294,13	0,95	4	1	2,5
8	30s	3V	Film	3,68	11,47	83,15	0,92	7	4	5,5
9	30s	5V	Silicone	0,43	33,96	6,68	0,93	9	8	8,5

Pour présenter une durée de vie satisfaisante, une structure électrochrome doit à la fois posséder un changement de couleur nettement visible et un changement de couleur stable dans le temps. Les analyses effectuées ont montré que ces deux paramètres dépendent fortement de l'interaction entre la tension appliquée et la durée d'application de cette tension. De plus, ils se sont révélés être en contradiction. Une tension élevée appliquée pendant un temps long permet d'obtenir un changement de couleur initialement bien visible ; en revanche, celui-ci est peu stable, l'écart de couleur entre l'état oxydé et l'état réduit se dégrade rapidement et la durée de vie de la structure est très courte. Inversement, une tension faible appliquée pendant un temps court permet de n'observer qu'une faible dégradation de l'écart de couleur, le changement de couleur est donc plus stable dans le temps. Cependant, le changement de couleur est peu visible, parfois même trop peu pour être distingué par l'œil. En conséquence, un compromis doit être trouvé entre la visibilité du changement de couleur et sa stabilité dans le temps.

Afin d'identifier une seule configuration optimale, les différentes configurations sont classées selon leurs résultats en temps spécifique et en nombre de cycles. Leur classement moyen est calculé et la configuration ayant le meilleur classement moyen est identifiée comme étant la configuration optimale permettant un vieillissement maximal. (Tableau 12) La configuration de numéro 2, suivant laquelle 3V est appliqué pendant 3 secondes, a le meilleur classement global.

3.4.4 Homogénéité et variation de l'homogénéité de la couleur

Nous avons étudié l'homogénéité de coloration de la structure électrochrome au moyen de deux méthodes : par seuillage et par comptage de pixel actifs. La méthode par seuillage consiste à déterminer l'histogramme d'une image représentant le nombre de pixels en fonction de la luminosité. (Figure 19) L'image en couleur est convertie en niveaux de gris, puis en noir et blanc selon un seuil prédéfini. L'image binarisée permet de visualiser clairement l'hétérogénéité de la coloration. En comptant le nombre de pixels respectivement noirs et blancs, il est possible de chiffrer cette hétérogénéité. Appliquée à une série de mesure, cette méthode permet d'observer l'apparition progressive de taches de vieillissement et leur extension.

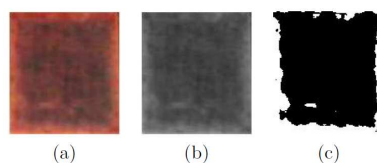


Figure 19 : (a) Image colorée d'une structure électrochrome dans son dernier cycle de mesure. (b) La même image en niveaux de gris. (c) La même image binarisée en noir et blanc.

La méthode par comptage de pixel actifs permet de compter le nombre de pixels actifs dont la couleur est significativement différente entre un état coloré et le suivant. Le seuil en-dessous duquel les pixels sont considérés comme inactifs est déterminé par l'utilisateur. De manière similaire à la méthode par seuillage, précédemment décrite, l'image est ensuite binarisée, les pixels actifs étant convertis en pixels blancs et les pixels inactifs en pixels noirs. Le comptage des pixels respectivement noirs et blancs permet de quantifier la part de la structure électrochrome changeant effectivement de couleur.

Paramètres de l'essai	Cycle n°	Image état réduit	Image binarisée	Pixels noirs	Paramètres de l'essai	Cycle n°	Image état oxydé	Image état réduit	Pixels actifs
3 V, 3 s	1			0,6 %	3 V, 3 s	1			100 %
3 V, 3 s	10			0,7 %	3 V, 3 s	10			94 %
3 V, 3 s	100			30,8 %	3 V, 3 s	100			13 %
3 V, 3 s	1000			100 %	3 V, 3 s	1000			11 %
5 V, 30 s	1			0,0 %	5 V, 30 s	1			100 %
5 V, 30 s	10			74,6 %	5 V, 30 s	10			57 %
5 V, 30 s	100			99,8 %	5 V, 30 s	100			0 %

Figure 20 : Résultat de l'étude de l'homogénéisation. (a) par méthode par seuillage. (b) par méthode par comptage de pixels actifs.

La Figure 20 représente les résultats d'analyse pour les configurations offrant la durée de vie la plus longue (3V-3s) et la plus courte (5V-30s). Le seuil de luminosité est à 100 pour la configuration de 3V-3s et 17 pour la configuration de 5V-30s. Un pixel est considéré comme actif si la variation de ses coordonnées de rouge, de vert et de bleu est non nulle d'un état à l'autre. Ces deux analyses permettent de démontrer qu'en terme d'homogénéité de la couleur, comme en termes de couleur moyenne, des cycles courts durant lesquels une tension assez faible est appliquée assurent une maximisation de la durée de vie. Une tension élevée appliquée pendant un temps long rend la structure électrochrome rapidement plus sombre, de coloration moins homogène, et provoque l'oxydation ou la réduction complète d'un grand nombre de pixels qui ne sont alors plus actifs.

4 Électrodes ECG textiles

4.1 Introduction

Une autre application des textiles électroniques concerne la réalisation des électrodes ECG pour le monitoring cardiaque. Ces travaux sont menés dans le cadre du projet collaboratif H2020 EtexWeld. Dans ce projet, les chercheurs de TTRI (Taiwan Textile Research Institute), l'un des partenaires du projet, nous ont montré un tricot conducteur qui permet de mesurer les signaux ECG. Ces électrodes sous la forme de tricot sont cousues sur un T-shirt et connectées avec un PCB rigide pour une application de monitoring des signaux ECG. En s'appuyant sur leur prototype, nous avons commencé nos études sur la réalisation des électrodes ECG à base de tricot enduit, de tricot conducteur commercial et de broderie par fil conducteur.

4.2 Électrodes ECG à base de l'étoffe enduit par le PEDOT:PSS

Les travaux sur la réalisation des électrodes ECG s'inscrivent dans la thèse CIFRE d'Amale ANKHILI démarré en juillet 2016 et visant à la conception d'un textile instrumenté pour le monitoring pour la société « @Health ». Ce cas concret est un bon exemple de développement à l'interface matériau/structure/traitement des données. Le service proposé par la startup @Health, consiste en l'association d'un dispositif médical connecté totalement intégré au sous-vêtement, à un système d'évaluation en temps réel des risques de pathologies cardiovasculaires. L'ENSAIT a eu en charge le développement du sous vêtement contenant les électrodes de mesure. Le développement de module électronique et de l'algorithme de monitoring est pris en charge par un autre établissement de recherche.

Fort de nos expériences précédentes dans le cadre du développement de cellules électrochromes, nous nous sommes orientés vers l'utilisation du PEDOT:PSS commercial (Clevios 105D, Heraeus) pour une étoffe conductrice. Ce produit est prévu pour former des dépôts minces et très conducteurs sur des substrats plastiques de type film. Pour garantir une accroche optimale sur une grande variété de substrats textiles, ce produit commercial a été modifié. Le procédé de modification développé dans le cadre de la thèse CIFRE est confidentiel et ne sera pas décrit ici.

Les électrodes à base d'étoffe enduit par le PEDOT:PSS sont obtenues par imprégnation. Les différentes étoffes sont plongées dans la solution modifiée, égouttées puis séchées à 110°C pendant 1h. Les étoffes ayant des degrés d'hydrophilie à structures et porosités différentes, la masse de PEDOT:PSS absorbée par les textiles est variable. Les pourcentages massiques de PEDOT:PSS absorbés par trois tricots en coton, polyamide et polyester sont présentés dans le Tableau 13. Les textiles imprégnés sont découpés pour mesurer leur résistivité surfacique (Keithley 8009).

Tableau 13 : Pourcentages massiques de PEDOT:PSS absorbé et leurs résistivités surfaciques mesurées.

Tricots Textiles	Pourcentage massique de PEDOT:PSS absorbé	Résistivité surfacique	
		Moyenne (k Ω)	Écart-Type (k Ω)
	%		
Coton	6,0	21,02	0,64
Polyamide	4,4	34,26	0,74
Polyester	3,2	36,31	0,84

Les différences de masses absorbées sont importantes et vont pratiquement du simple au double pour le polyester et le coton, respectivement. Les résistivités obtenues sont élevées et au-delà de ce qui pouvait être attendu. La très forte rugosité et porosité des textiles ne permet pas d'obtenir un dépôt continu en surface malgré les quantités de PEDOT:PSS relativement importantes absorbées, ce qui nuit à la conductivité globale des électrodes. Le coton imprégné propose la plus faible résistivité de surface, en accord avec la masse de PEDOT:PSS absorbée qui est élevée.

Pour les électrodes à base de coton ou de polyamide, la résistivité varie quasi linéairement avec le nombre de cycles. Cependant après 50 cycles, la résistivité pour les électrodes à base de coton n'augmente que de 4,9 fois contre 9,2 fois pour le polyamide. Les électrodes à base de polyester ne donnent pas de bons résultats, la dégradation pour ce qui est de la résistivité, est constatée à partir de 22 cycles de lavage. (Figure 21)

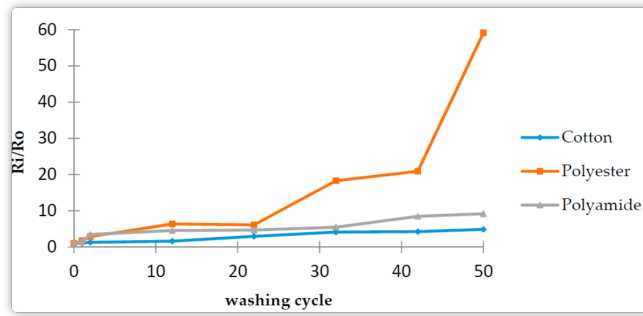


Figure 21 : Évolution de la résistivité surfacique des tricots de différentes natures imprégnés de PEDOT:PSS en fonction du nombre de lavages subis.

La résistivité surfacique fournit une vision globale des performances électriques des électrodes. Cependant, le critère ultime d'évaluation de la qualité des électrodes reste la qualité du signal ECG acquis. Afin de réaliser des mesures rapides, pertinentes et discriminatoires, les signaux ECG présentés dans la Figure 22 ont été réalisés par l'électrocardiographe médical (Colson Cardipocket 2). Son écran LCD permet de visualiser le signal ECG pendant l'enregistrement et permet aussi de contrôler le mode de fonctionnement manuel ou automatique, la vitesse de défilement, la sensibilité, etc. Cet appareil médical portable imprime les relevés pour une validation ultérieure par un cardiologue. Pour connecter les électrodes, un câble avec connecteur professionnel de type "Snap" est utilisé. Ce câble est équipé d'une fiche jack 3 contacts permettant le branchement direct sur l'appareil de mesure. Les trois électrodes textiles sont placées sur les deux poignets et la cheville droite.

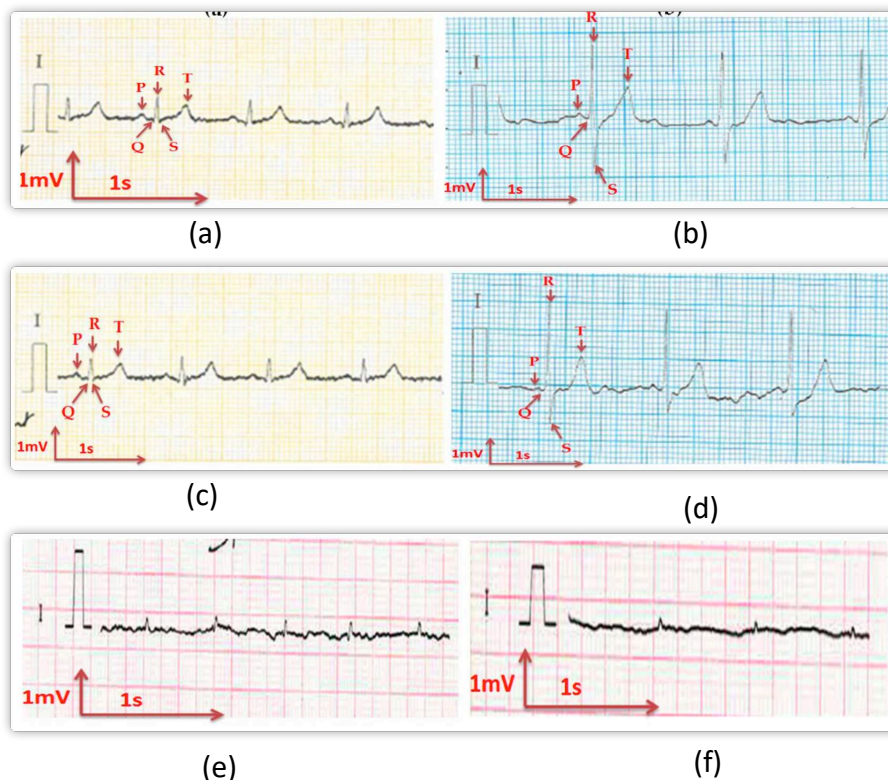


Figure 22 : Signaux ECG mesurés par les électrodes à base des tricots enduits par le PEDOT:PSS (a) en coton avant lavage (b) en coton après lavage (c) en polyamide avant lavage (d) en polyamide après lavage (e) en polyester avant lavage (f) en polyester après lavage.

Selon un cardiologue expérimenté, les électrodes sont considérées de qualité médicale si, et seulement si, elles sont capables de détecter toutes les ondes électrocardiographiques : P, Q, R, S et T. Ces ondes sont indispensables pour effectuer un diagnostic car elles fournissent toutes les informations nécessaires sur l'état de santé du cœur. Les signaux ECG obtenus par les électrodes en coton et en polyamide sont exploitables avant, ou après, 50 lavages en machine de lavage de laboratoire. Pendant les enregistrements du signal ECG, nous avons constaté que, pour commencer à visualiser le signal avec les électrodes en polyamide, nous avons eu besoin d'attendre environ une minute, c'est-à-dire que la peau commence à transpirer. Cependant, les électrodes en polyester ne donnent pas de signal ECG même après humidification de l'électrode. Ceci correspond aux mauvais résultats électriques. Une électrode qui n'est pas capable de générer un signal ECG signifie que l'impédance de contact peau/électrode est très élevée.

4.3 Électrodes ECG à base des tricots conducteurs commerciaux

Pour avoir un benchmark sur les produits commerciaux en comparant avec nos tricots enduits, nous avons testé quatre tricots conducteurs commerciaux. Ces travaux sont menés par le doctorant Shahood Uz ZAMAN pendant sa thèse. Étant donné que les tricots commerciaux possèdent des résistivités très faibles (environ 200 - 1000 Ω), l'appareil de mesure Keithley 8009 n'est pas adapté pour une aussi faible résistivité surfacique. Nous avons utilisé la méthode quatre points (Ossila, United Kingdom) pour mesurer la résistance par carré. Le Tableau 14 récapitule les valeurs de résistance par carré de quatre produits commerciaux. D'après la Figure 23, nous constatons que les échantillons F1 et F4 possèdent une résistance par carré élevée (0,33 Ω/\square et 1,45 Ω/\square). Mais après 50 cycles de lavage (option soie), la résistance par carré de F2 a augmenté plus de 3 fois et celle de F3 a augmenté 15 fois. Les échantillons de F1 et F4 ne changent pas leur résistance par carré.

Tableau 14 : Résistance par carré pour quatre tricots commerciaux.

Référence	Nom de produit	Fournisseur	Résistance par carré (Ω/\square)
F1	RF Shielding Silver Fabric	Faradaydefense LLC	0,33
F2	RF Shielding Nickel Copper Fabric	Faradaydefense LLC	0,038
F3	RF Shielding Copper Fabric	Faradaydefense LLC	0,042
F4	Silver-plated Fabric	Innovative Textile	1,45

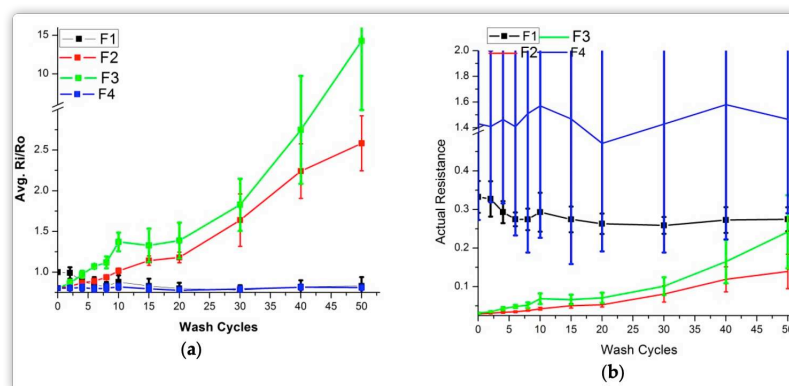


Figure 23 : Évolution de la résistance par carré de quatre tricots en fonction du nombre de lavages subis.

Afin de réaliser des mesures ECG, nous avons utilisé l'appareil SHIELD-EKG-EMG (OLIMEX). Il possède une sortie numérique, permettant de récupérer les données. D'après la Figure 24, nous constatons que ces quatre tricots procurent les signaux ECG avant et après lavage.

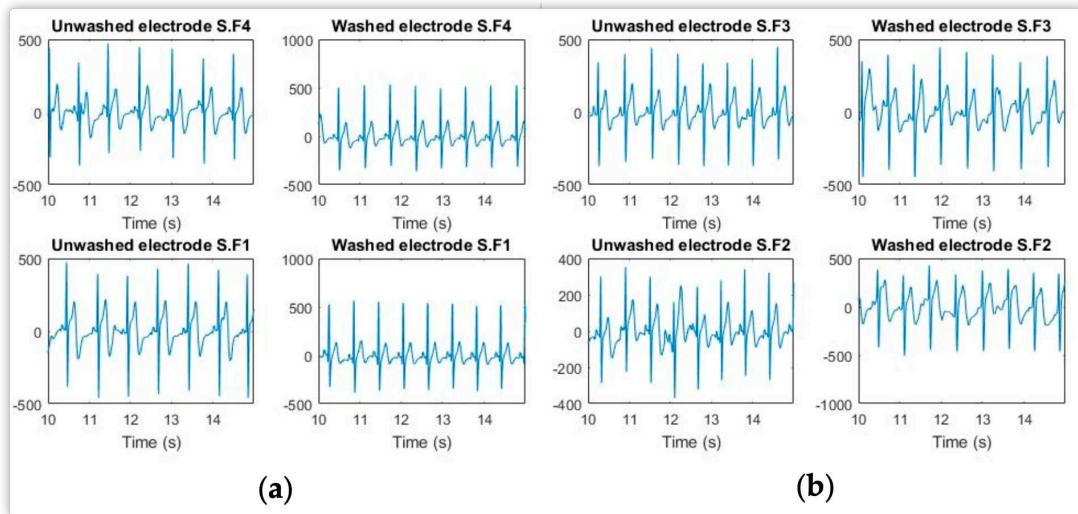
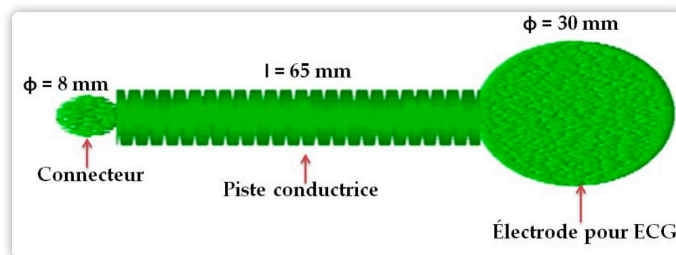


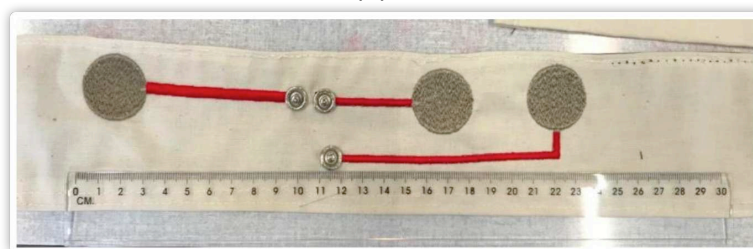
Figure 24 : Signaux ECG mesurés par les électrodes à base des tricots commerciaux. (a) avant lavage (b) après lavage.

4.4 Électrodes ECG à base des fils conducteurs

Les travaux sur la réalisation des électrodes ECG à base des fils conducteurs s'inscrivent dans la thèse d'Amale ANKHILI. La conception des bandeaux pour ECG a été créée sur le logiciel Base Pac8 destiné à la bordure industrielle (JF 0215-495, ZSK). La Figure 25a illustre la conception d'une électrode brodée. Les électrodes sont réalisées par le fil conducteur (Shieldex 177/2-ply HCB ou Madeira H40). Un fil ordinaire rouge est utilisé pour couvrir les pistes conductrices pour la protection contre lavage. Les connecteurs sont réalisés par les boutons pressions.



(a)



(b)

Figure 25 : (a) Allure d'une électrode bordée. (b) Prototype de bandeau avec trois électrodes brodées.

Les bandeaux brodés ont été lavés 50 fois en machine domestique, selon la norme ISO 6630. La Figure 26 présente les signaux ECG avant (a et c) et après 50 lavages (b et d), enregistrés par la carte SHIELD-EKG-EMG. Visuellement les signaux ECG obtenus sont très propres par rapport aux signaux enregistrés précédemment par les électrodes PEDOT:PSS. Les ondes électrocardiographiques sont clairement identifiées avant et après 50 lavages, que ce soit pour les bandeaux brodés avec le fil Shieldex ou Madeira. Ces tests ne montrent aucune différence entre les fils Shieldex et Madeira.

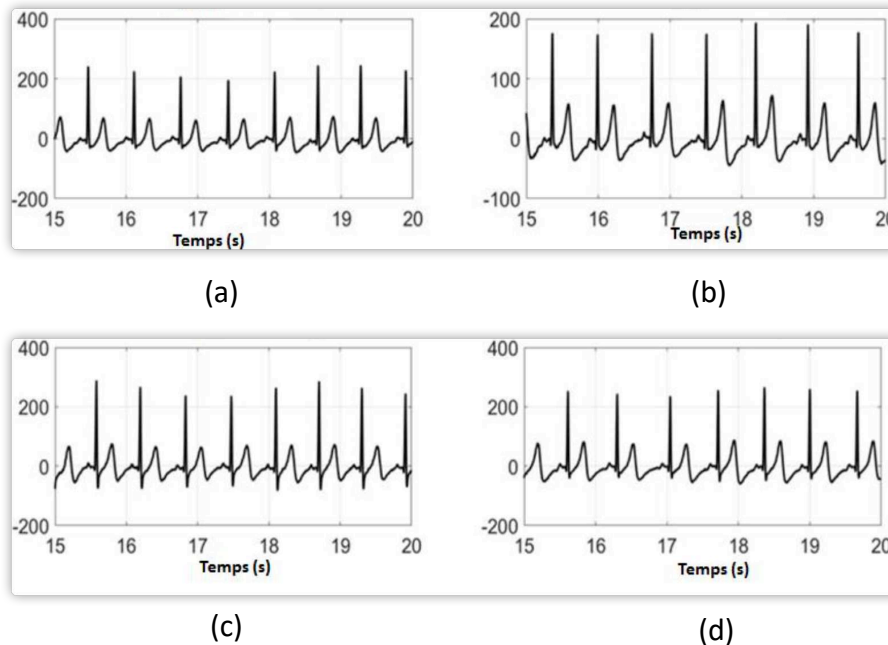


Figure 26 : Signaux ECG obtenus par les bandeaux bordés. (a) Shieldex avant lavage. (b) Shieldex après lavage. (c) Madeira avant lavage. (d) Madeira après lavage.

En utilisant la même méthode, nous avons développé un prototype de vêtement avec 256 électrodes textiles brodées en collaboration avec UCL (University College of London) dans un projet privé. L'idée est de réaliser un vêtement équipé des électrodes textiles. (Figure 27) Ces dernières doivent être compatibles avec le traitement de IRM cardiaque. Ce vêtement doit être lavable. L'objectif de ce projet est d'obtenir une IMR cardiaque à haute résolution de manière non invasive pour avoir une distribution des potentiels péricardiques du cœur entier grâce à des électrodes haute densité recouvrant le torse. La mesure de l'IMR cardiaque est en cours dans l'UCL.

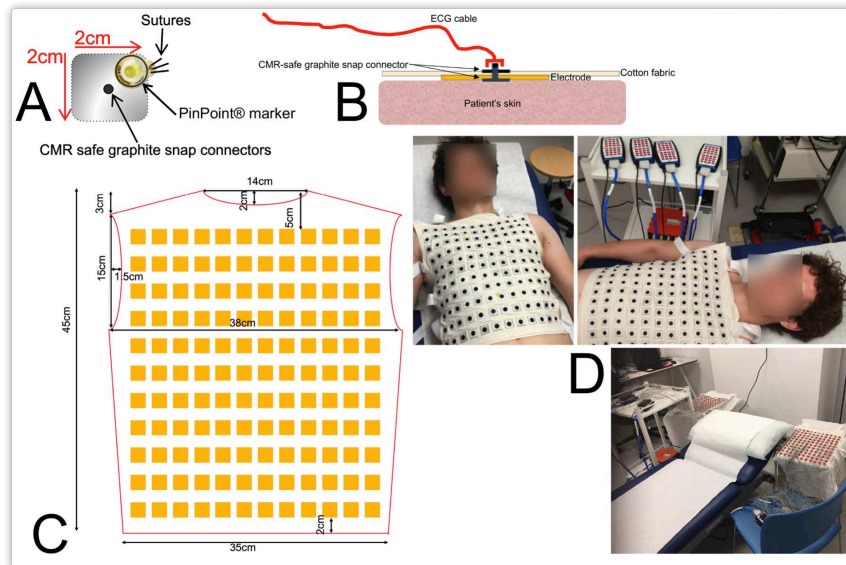


Figure 27 : Prototype de vêtement ECGi. (a) Forme d'électrode. (b) Configuration de bouton pression. (c) Configuration des électrodes sur le vêtement. (d) Photo de porteur pendant la caractérisation des signaux d'ECG.

5 Antennes textiles

Les travaux sur la réalisation des antennes textiles s'inscrivent dans le projet LUMINOPTEx en collaboration avec IEMN. Ce projet porte sur la conception et la mise en œuvre de nouveaux textiles intelligents pour des applications « éclairage ambiant autonome » pour du design intérieur, tissu décoratif ou encore signalétique. Le rôle de l'ENSAIT est de développer les antennes textiles récupératrices d'énergie. Nous avons recruté un ingénieur, Anaïs LEBLANC, qui travaille sur la conception et la fabrication des antennes à la broderie. Des matériaux ont été sourcés (fils à broder conducteurs et support de broderie) et testés avec des résultats variables en termes de conductivité intrinsèque et de leur processabilité.

5.1.1 Antenne sous la forme de patch

Nous avons commencé par la fabrication des antennes brodées sous la forme de patch avec le fil conducteur Shieldex. Ces antennes se composent d'une partie supérieure (patch à géométrie « rectangulaire » ou « circulaire ») et d'une partie inférieure, sous le textile, constituées d'un « plan de masse » (Figure 28a). Dans le but de caractériser au plus vite et uniquement la partie patch, nous avons convenu entre partenaires d'utiliser un plan de masse sous forme d'une feuille métallique. 2 voies ont été exploitées, i) plan de masse en cuivre de 18 et 35 μm (pilote par l'IEMN) et ii) plan de masse en aluminium de 18 μm (pilote par l'ENSAIT).

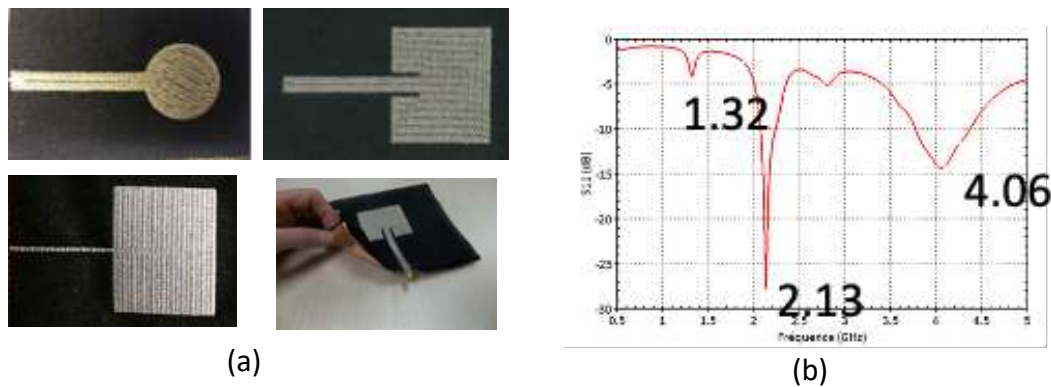


Figure 28 : (a) Photos des antennes textiles brodées. (b) Résultat de caractérisation de l'antenne brodée textile.

Les tests et caractérisations effectués par l'IEMN ont montré que l'antenne rectangulaire est celle qui donne les meilleurs résultats en termes de rayonnement. Il en résulte une forte désadaptation d'impédance de la ligne d'accès à l'antenne et quasiment tout le signal est réfléchi à l'entrée de la ligne. En tenant compte de cette épaisseur effective, la largeur de la ligne d'accès a été redéfinie par simulation. Dans le but de les optimiser et d'améliorer le gain, quatre designs d'antennes patch avec plan de masse ont été réalisés en faisant varier la largeur de la ligne d'accès de 1 ; 1,5 ; 2 et 3mm au lieu de 8mm. Cependant les antennes patch possèdent un plan de masse en aluminium difficile à mettre en place. Le résultat de caractérisation montre qu'il y a trois pics au lieu d'un à 2,45 GHz. Leurs gains mesurés restent faibles. (Figure 28b)

5.1.2 Antennes métamatériaux

Afin de s'affranchir du plan de masse métallique, l'IEMN a proposé des antennes à base de métamatériaux et ces dernières sont fabriquées à l'ENSAIT. Outre la suppression du plan de masse, l'utilisation des métamatériaux est envisagée afin de réduire la taille des antennes et la consommation de fil conducteur. Ces antennes comportent un élément rayonnant (antenne dipôle) couplé à des résonateurs à anneaux fendus (cellule issue des métamatériaux) (Figure 29).

Le premier design d'antenne comporte un rayonnant rectiligne couplé à des résonateurs à anneaux fendus (SRR, Sprint Ring Resonator) de forme carrée. Cette géométrie présente deux inconvénients : (1) le changement de direction de la broderie à chaque coin des anneaux peut augmenter les pertes dues à une augmentation localisée de la résistance à chaque angle, et (ii) le couplage entre dipôle et les SRRs est limité à la largeur des SRRs en vis à vis avec le dipôle. Pour améliorer le couplage et réduire les pertes, un dipôle en forme de S et des anneaux circulaires ont été envisagés.

Bien que le principe de fonctionnement des antennes à métamatériaux de forme rectiligne ou circulaire reste identique, la modification de la répartition du courant dans le dipôle rayonnant nécessite d'étudier l'influence de la position des fentes des anneaux par rapport au dipôle. Une étude de simulation a montré que les anneaux doivent être tournés de 90° dans le sens trigonométrique afin de favoriser le couplage entre le dipôle circulaire et les SRRs. Suite à cette étude, des antennes à métamatériaux de forme circulaire ont été étudiés avec deux objectifs différents. Le premier était la réduction de la taille de l'antenne en cherchant à faire résonner les SRRs à une fréquence bien inférieure à la fréquence de résonance du dipôle. Le

second état d'obtenir un fonctionnement équilibré afin d'envisager le fonctionnement de l'antenne en double bande (par exemple en GSM 1.8GHz et en WiFi 2.4 GHz).

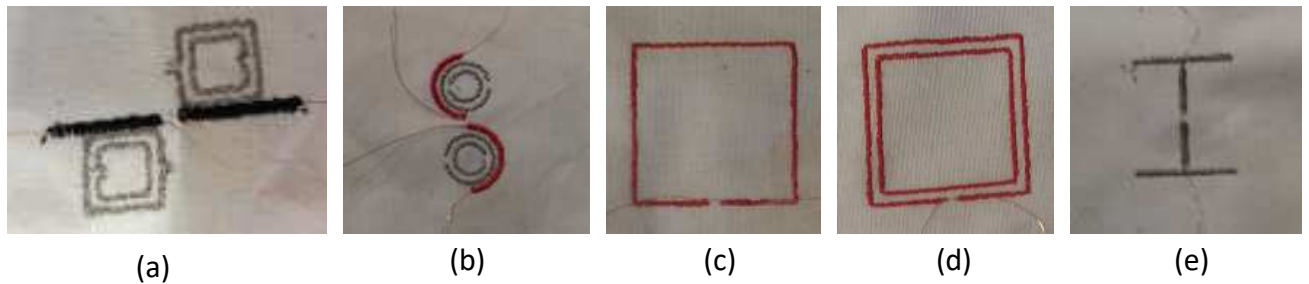


Figure 29 : Photos des antennes métamatériaux. (a) Forme « carrée » (b) Forme « demi-cercle » (c) Simple Boucle. (d) Double boucle (e) Forme « H ».

Parallèlement à ces études, d'autres structures ont été simulées. Il s'agit d'antennes simple boucle (Single Loop Antenna) et double boucle (Double Loop Antenna). L'objectif de la structure double boucle est d'améliorer l'adaptation d'impédance de l'antenne comparativement à une simple boucle. Enfin, une structure en forme de H, s'inspirant des métamatériaux développés dans la littérature en technologie de circuit imprimé, a aussi été simulée en vue d'évaluer ses performances lors d'une fabrication par broderie.

Pour les antennes en forme de « carré » et « demi-cercle », un gain maximum de 0 dBi a été mesuré à 1,8GHz et -3,1 dBi à 2,2GHz. Pour les antennes en forme de H, une bonne comparaison théorie/expérience a été obtenue pour les réponses fréquentielles sous réserve d'utiliser en simulation une conductivité faible (8000 S/m) des motifs conducteurs brodés. Les diagrammes de rayonnement expérimentaux ont montré des résultats disparates, notamment avec des gains variant de -37 à -1 dBi selon les échantillons. Cette disparité de la valeur du gain mesuré a été attribuée à des problèmes probables de connexions. En ce qui concerne les antennes boucles, l'amélioration de l'adaptation d'impédance par le doublement de la boucle a été constatée expérimentalement avec des pertes par retour supérieures à 20 dBi à la résonance comparativement à une plus faible valeur mesurée d'environ 6 dBi pour l'antenne simple boucle. L'analyse de l'impédance d'entrée des antennes a aussi montré l'augmentation de la réactance de l'impédance d'entrée par le doublement de la boucle. Par ailleurs, il a été observé expérimentalement un fort décalage (de l'ordre de 20%) vers les basses fréquences de la résonance des antennes double boucle. Enfin, le gain mesuré sur les antennes boucles était très inférieur à celui attendu. Le gain était d'environ 2 dBi en simulation alors qu'il était inférieur à -3,8 dBi en mesure.

5.1.3 Antenne Yagi Uda SRRs

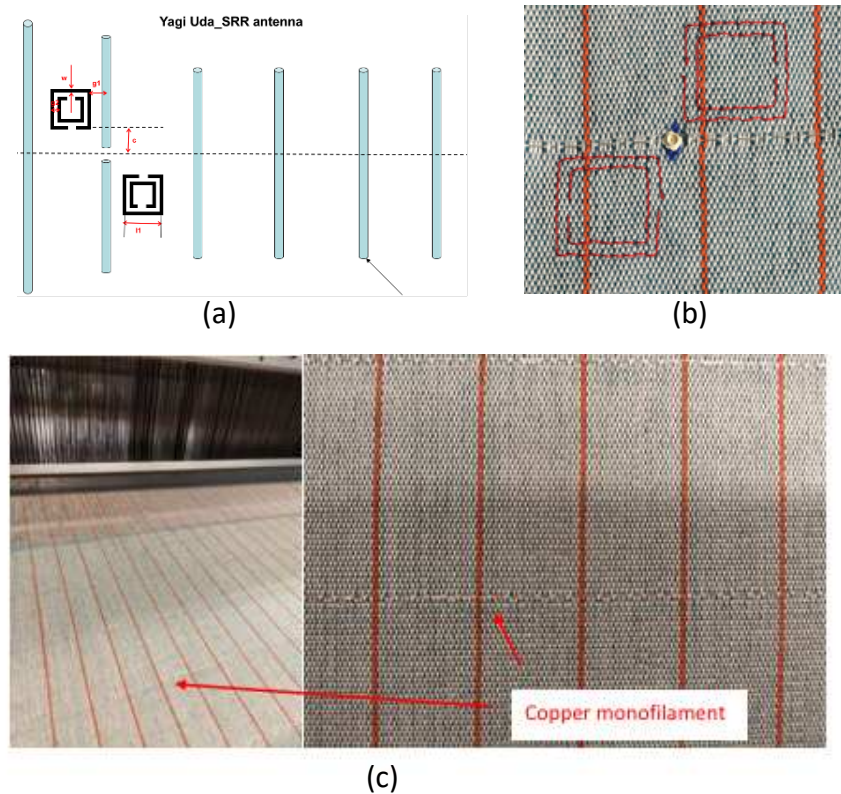


Figure 30 : (a) Design de l'antenne Yagi-Uda avec SRR. (b) Photo de l'antenne. (c) Photo de tissu avec le filament en cuivre inséré dans le tissu.

Le design des antennes est toujours en évolution compte tenu des caractérisations électromagnétiques et des études bibliographiques. Ainsi l'antenne brodée dipôle carré avec SRR a été incluse dans une base Yagi-Uda (« Reflector » et « Director ») obtenue par tissage. Les antennes Yagi-Uda tissées sans SRR montrent une très bonne adaptation d'impédance autour de 2,5 GHz avec un coefficient de réflexion inférieur à -20 dB pour la plupart des antennes et même -30 dB pour certaines d'entre elles. Il a été observé aussi un élargissement de la bande de fonctionnement qui est attribué à la dissymétrie des structures fabriquées. Les antennes sont produites en intégrant le fil de cuivre lors du tissage du textile, puis ces fils sont coupés manuellement aux dimensions souhaitées. Ainsi, la longueur des fils peut varier légèrement par rapport au dimensionnement de l'antenne initiale, ce qui produit plusieurs résonances autour de la fréquence ciblée (2,45 GHz). Le diagramme de rayonnement expérimental confirme la directivité de ces antennes et des gains élevés supérieurs à 8 dBi ont été mesurés.

Les antennes Yagi-Uda intégrant les SRRs brodés montrent des performances légèrement inférieures en termes de gain (de 6 à 8 dBi) autour de 2,5 GHz. A la fréquence de résonance des SRRs (environ 1,8 GHz), l'antenne présente une moins bonne adaptation d'impédance avec une réflexion d'environ -10 dB, ainsi qu'un gain de 1 à 2 dBi.

6 Conclusion

Dans le cadre des travaux menés sur les textiles électroniques, nous avons à la fois développé les prototypes en collaboration avec d'autres laboratoires, mais aussi réalisé un travail approfondi sur les structures e-textiles.

Les travaux sur les transistors fibreux présentent mes premières activités scientifiques. Ces travaux répondent aux problématiques de la réalisation des composants électroniques à base de textiles. De plus, la faisabilité de développement du circuit électrique textile a été démontrée.

Les travaux sur les cellules électrochromes ont montré la possibilité de créer des afficheurs textiles souples. Le prototype d'afficheur de sept segments a été également créé.

Concernant les travaux sur les électrodes ECG, nous avons commencé en utilisant la méthode de fabrication des étoffes électrochromes, en modifiant la solution de PEDOT:PSS pour que ces dernières soient plus conductrices et lavables. Ensuite, les autres étoffes conductrices ont été testées. Enfin, nous avons utilisé la technologie de broderie pour réaliser ces électrodes. Au cours de ces études, nous avons pris en compte la lavabilité des échantillons. Plusieurs études comparatives ont été menées pour réaliser des prototypes lavables.

Dans le cadre du projet LUMINOPTEx, nous avons fabriqué plusieurs types d'antennes, en collaboration avec l'IEMN. Ce projet a permis à un consortium multidisciplinaire transfrontalier, Belgique – France, de travailler efficacement sur une application de type « éclairage ambiant autonome ». Dans ce contexte, nous avons collaboré plus étroitement avec l'IEMN pour produire, jusqu'à maintenant, trois designs d'antennes (patch, SRR et Yagi Uda). L'antenne au design « patch » a montré des résultats mitigés en termes de gain et une faible transférabilité industrielle. Le design de « SRR » est plus adapté aux technologies textiles. La caractérisation des antennes utilisant le design « Yagi Uda » est en cours.

Mes activités liées au développement des textiles électroniques (e-textiles) ont été valorisées par 14 publications, 2 chapitres d'ouvrages et 10 communications en conférences scientifiques internationales.

Troisième partie – Travaux sur les intégrations des électroniques dans la structure textile

1 Introduction

On peut trouver actuellement beaucoup de prototypes de systèmes e-textiles au sein des laboratoires de recherche académique et industriels. Cependant, il y a relativement peu de produits finis e-textiles disponibles sur le marché, en raison de l'existence des deux grands verrous scientifiques et technologiques : 1) la fiabilité des interfaces et contacts entre les composants électroniques et les substrats textiles 2) la lavabilité et la possibilité de nettoyage de ces systèmes complexes sont souvent fragiles. Ces deux verrous empêchent les industries de fabriquer des systèmes e-textile fiables et de les mettre sur le marché.

En ce qui concerne la réalisation d'une interface entre les composants électroniques et les structures et substrats textiles, il existe plusieurs technologies de connexion, comme le collage [72], [73], le flip-chip [74], [75], le sertissage [76], la broderie [77], [78], la soudure [79], l'aimant [80], etc. Néanmoins, certains d'entre eux ne conviennent pas aux fils conducteurs à base de polymère en raison de l'exigence d'une température élevée. Aussi, certaines de ces méthodes sont plus un bricolage manuel ne convenant pas à la production en série.

Les travaux décrits dans ce chapitre concernent mes activités de recherche sur ce premier verrou scientifique et technologique. Les composants électroniques sont des dispositifs rigides. Les substrats et structures textiles sont des milieux souples. La difficulté consiste en la réalisation d'une connexion fiable entre les composants électroniques et les structures textiles.

La première solution emmerge du projet Homo Textilus (ANR). Un circuit électronique rigide est monté sur un T-shirt pour contrôler quatre cellules électrochromes. Ensuite, pendant le projet EtexWeld (Horizon 2020), plusieurs essais ont été réalisés pour intégrer un circuit intégré multicouche rigide capable d'enregistrer des paramètres physiologiques et les accélérations en x, y et z des porteurs et de les envoyer, en utilisant le protocole de communication Zig Bee, vers une base de supervision.

Ensuite, afin de réaliser une intégration fiable, compatible avec les textiles et quasiment transparente à l'utilisateur, un processus d'intégration par la technologie de broderie en utilisant un circuit électronique souple comme interface a été développé. Ce travail a été mené en collaboration avec « Taiwan Textile Research Institute » (TTIR) situé à Taipei dans le cadre du projet EtexWeld (Horizon 2020). Le circuit souple a été intégré dans un ruban textile ou dans un T-shirt pour capter les signaux ECG et de respiration, la température de la peau et les accélérations selon les directions x, y et z afin de détecter les fonctions vitales et les activités (mouvements) du porteur.

Le dernier développement relatif à ces travaux de recherche a abouti à une réalisation de circuit électronique sans le support PCB flexible ou rigide, en intégrant les composants électroniques directement sur l'étoffe. Ainsi, nous avons développé un fil textile compatible avec le processus de soudure. Par conséquent, plusieurs circuits électroniques ont été réalisés en intégrant des LEDs et des composants électroniques (deux verrous et une série vers parallèle) dans le cadre du projet LUMINOPTX (EU Interreg V).

2 Les circuits rigides intégrés dans la structure textile

2.1 Connection par bornier de connexion

Comme discuté dans le chapitre précédent, nous avons développé des cellules électrochromes à base de PEDOT:PSS dans le cadre du projet Homo Textilus (ANR). Nous avons utilisé quatre cellules électrochromes sous forme triangulaire commandés indépendamment pour réaliser un prototype d'afficheur textile. (Figure 31a) Afin de développer le système de commande, un circuit imprimé rigide a été réalisé, puis intégré dans le T-shirt. L'objectif du système de commande conçu est de permettre à la fois l'affichage automatique de différentes configurations et l'intervention de l'utilisateur pour permettre d'afficher manuellement l'une ou l'autre des configurations. Un microcontrôleur (Arduino Micro) est donc utilisé pour la commande automatique et un bouton poussoir soudé sur le circuit imprimé rigide permet à l'utilisateur d'intervenir sur le déroulement du programme. Les microcontrôleurs « compatibles » avec le textile, comme Lilypad et Adafruit Flora ont été étudiés pendant ce projet. Comme ils ne comportaient pas assez de broches de communication (il fallait six broches analogiques et sept broches numériques), nous avons décidé d'utiliser la carte « Arduino Micro ».

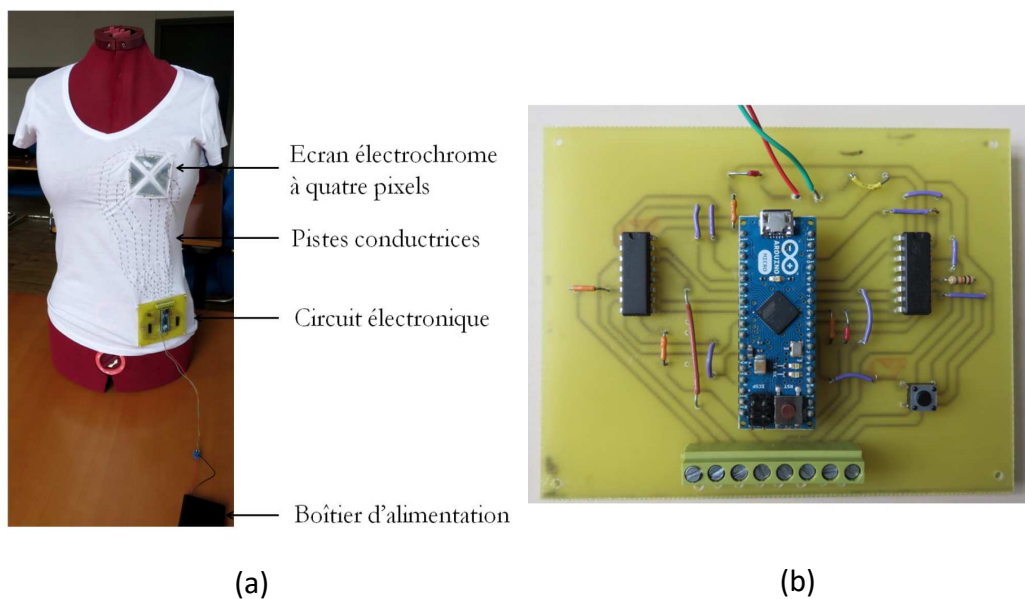


Figure 31 : (a) T-shirt communicant équipé d'un afficheur électrochrome à quatre pixels commandés indépendamment par un circuit imprimé cousu sur le T-shirt. (b) Photo du circuit électronique de commande d'un afficheur électrochrome à quatre pixels.

Pour qu'un changement de couleur électrochrome soit observable, il ne suffit pas d'appliquer une tension pour "allumer" le pixel et de ne plus appliquer de tension pour l'éteindre. Il est nécessaire de pouvoir passer d'une tension positive à une tension négative. Cette nécessité d'inversion de tension requiert la présence d'un pont « H » dans le circuit. Chaque pont « H » est en réalité double et dispose de quatre sorties. Pour commander les quatre pixels électrochromes, deux ponts « H » sont donc nécessaires. Un bouton poussoir permet d'envoyer un signal manuel au microcontrôleur afin de modifier le cours du programme. Deux borniers permettent respectivement la connexion des huit fils commandant les quatre pixels électrochromes et des deux fils d'alimentation électrique. (Figure 31b)

Les pistes conductrices sur le T-shirt sont réalisées par la couture manuelle d'un fil en acier inoxydable. Un côté de fil inox est cousu avec la cellule électrochrome, l'autre côté est inséré dans la bornier de connexion et fixé par une vis.

Sur ce prototype, nous constatons que le circuit imprimé rigide occupe une espace importante qui n'est pas compatible avec la structure légère du textile et nuit fortement au confort et à la souplesse du produit T-shirt fini. Un circuit électronique ne nécessite pas seulement un microcontrôleur mais aussi des composants électroniques comme les résistances, les ponts « H », les boutons poussoir, etc. Par conséquent, la dimension de circuit est importante. Ainsi, la suite logique des travaux de recherche était d'intégrer un circuit miniaturisé.

2.2 Connexion par soudure et broderie

Dans le cadre du projet EtextWeld, le groupe de TEIP (Technological Education Institute of Piraeus) a développé un circuit électronique pour capter les signaux environnementaux et physiologiques avec une module de communication basées sur le protocole ZigBee. L'objectif de l'ENSAIT était de l'intégrer dans la structure textile. Nous avons utilisé le PCB flexible comme interface pour connecter le fil conducteur textile et le PCB rigide.

Dans un premier temps, nous avons soudé directement le PCB flexible sur le PCB rigide. Le point de soudure se trouve au niveau des trous sur le PCB rigide. Le PCB flexible peut être collé sur la structure textile par un film thermocollant ou cousu par le fil ordinaire. (Figure 32) Cependant, si la distance entre les connecteurs dans le PCB rigide est très faible, il est très difficile de souder le PCB flexible. Pour pallier à ce problème, nous avons utilisé le fil métal pour réaliser un pont entre les PCB flexibles et rigides. (Figure 33) L'avantage de l'utilisation de PCB flexible est le fait qu'il est possible d'utiliser les techniques de « couture » ou de « broderie » pour intégrer les composants électriques textiles comme électrodes ou capteurs textiles.



Figure 32 : Photo de la connexion entre le PCB flexible et rigide.

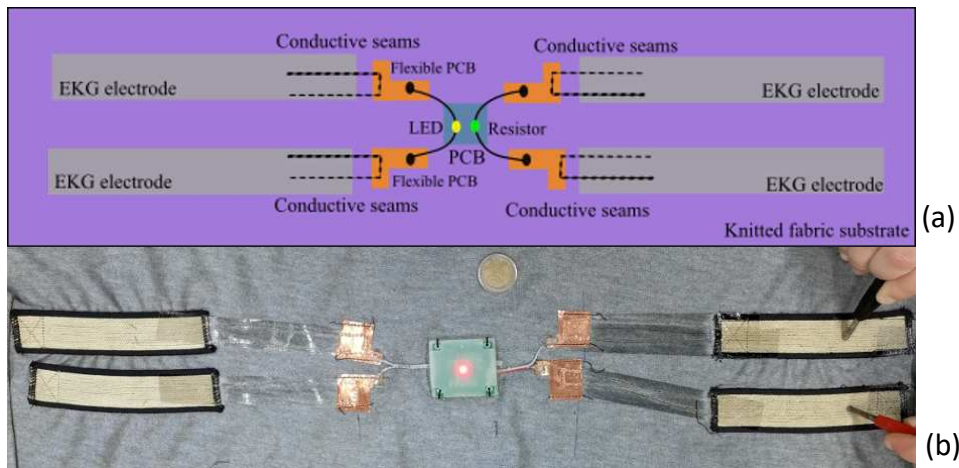


Figure 33 : (a) Schéma de l'intégration des PCB flexible et rigide via les fils métaux. (b) Photo de prototype.

Par rapport à la connexion par le bornier, la connexion réalisée par la soudure est fiable. Malheureusement, la soudure introduit un risque de destruction de la structure textile par la température élevée. Pour pallier à ce problème, les méthodes de connexion à base de colle conductrice ont été envisagées. De plus, le PCB rigide influence fortement le confort et le touché des structures textiles.

3 Les circuits souples intégrés dans la structure textile

3.1 Connexion par adhésion avec le film conducteur

En collaborant avec les chercheurs de TTRI, nous avons développé une méthode d'intégration des composants électroniques sur la structure textile. L'adhésion des composants électroniques se fait par le film TPU (Thermoplastique PolyUréthane) et ACF (Anisotropic Conductive Film). Nous avons ainsi réalisé deux prototypes : « T-shirt intelligent » et « écran textile ».

Le « T-shirt intelligent » est un vêtement connecté capable de surveiller les signaux physiologiques. (Figure 34) Les pistes conductrices et les électrodes en argent sont réalisées par la sérigraphie sur un film TPU. Le microcontrôleur et les capteurs sont soudés sur un PCB flexible. La connexion entre le film TPU et le PCB flexible est réalisée par le film adhésif ACF. Les films ACF sont généralement composés d'une matrice polymère adhésive et d'une fine charge conductrice utilisant des particules métalliques ou des billes de polymère recouvertes de métal. Par rapport à la soudure, la connexion avec un contact électrique et mécanique de forme ACF possède trois avantages : 1) la résistance de connexion est supérieure, 2) température de collage est inférieure et 3) la distance entre les pads est faible. [81] Des travaux de recherche et de développement intensifs ont été réalisés dans le domaine de technologie flip-chip et chip-on-glass utilisant l'ACF comme alternative à la soudure. Le courant électrique qui passe à travers les particules conductrices d'électricité de l'ACF devient un chemin de conduction dominants et le rôle de la particule conductrice est de maintenir une faible conductivité électrique. Les joints de conduction entre les particules et les surfaces conductrices sont construits par la déformation élastique/plastique de particules conductrices sous pression appliquée. [82] Par conséquent, les jonctions entre les électrodes et le FPCB ne

conduisent que dans la direction z (direction perpendiculaire du textile électronique). (Figure 35)

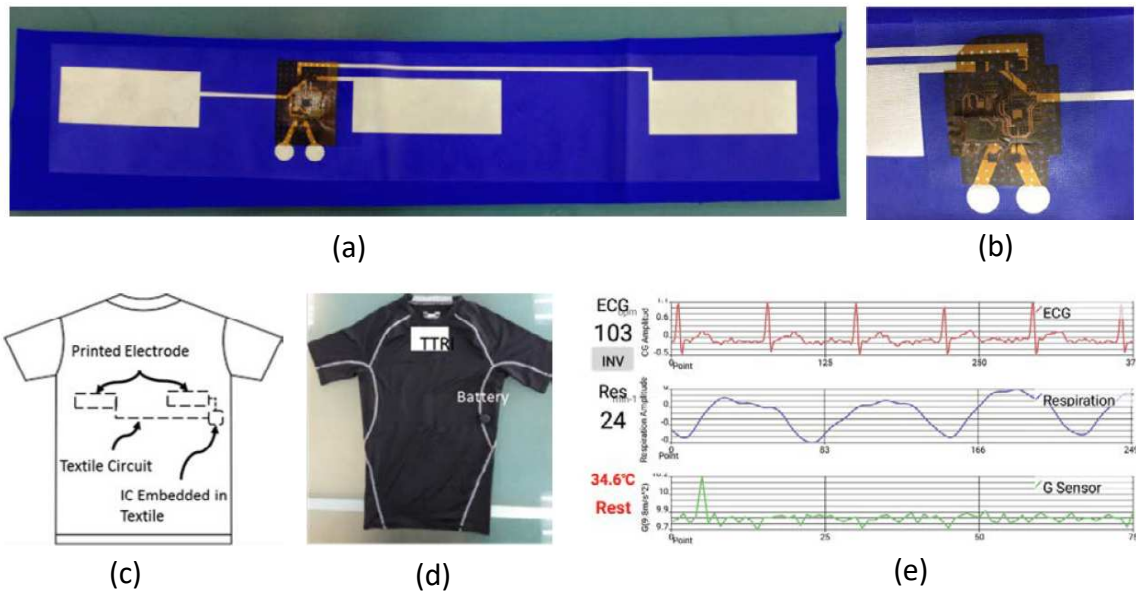


Figure 34 : Photo de prototype « T-shirt intelligent » (a) Piste conductrice en argent sur TPU. (b) PCB Flexible (FPCB). (c) Schéma de circuit de prototype. (d) Photo du prototype final (e) Logiciel de surveillance.

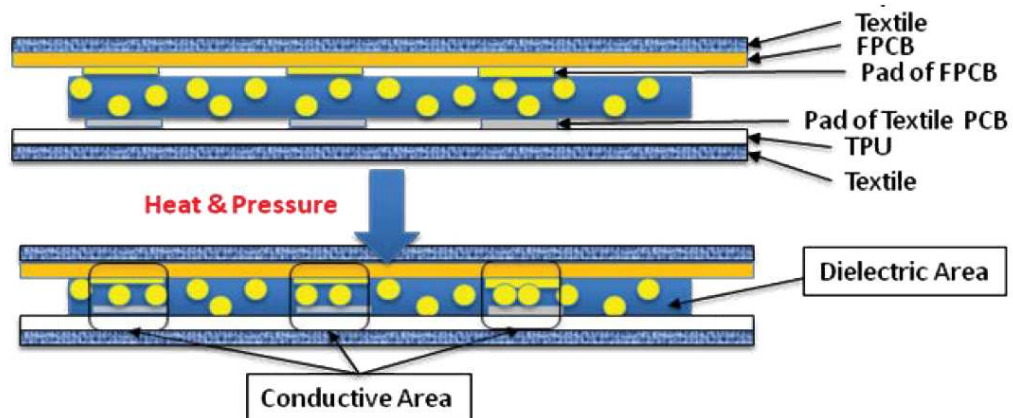


Figure 35 : Schéma de connexion entre le film TPU enduit par encre en argent et le PCB flexible.

Un autre exemple est le prototype de l'écran textile avec les LEDs intégrées directement sur le film TPU. Les pads des LEDs sont directement « collés » sur le film ACF.

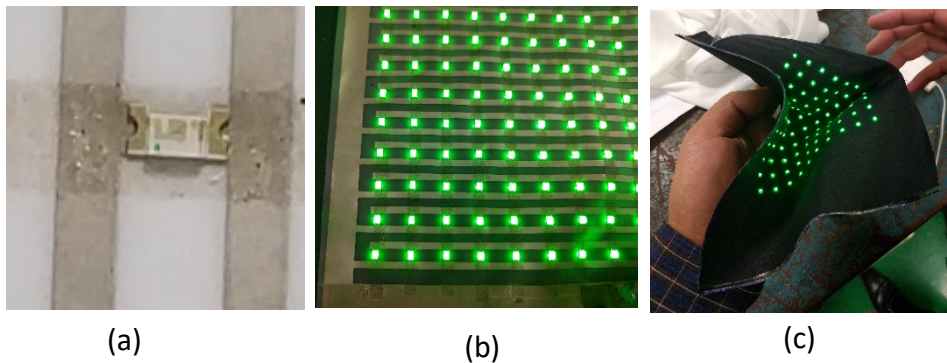


Figure 36 : Photo de l'écran textile. (a) LED collée sur le film TPU avec le film ACF. (b) LEDs actionnées. (c) Prototype final.

Même si le film ACF possède plusieurs avantages par rapport à la soudure, cette technologie a quelques inconvénients. 1) le prix du film ACF est élevé. 2) les conditions de travail sont strictes. Il faut conserver le film ACF dans une température de -10°C à 5°C . Le temps de préparation à température ambiante est de seulement 20 min. 3) Ce n'est pas une technologie connue dans l'industrie du textile. Donc, notre prochaine approche a été d'utiliser les technologies traditionnelles bien connues et maîtrisées dans l'industrie textile, comme la broderie et la couture, pour intégrer les composants électroniques.

3.2 Connection par broderie ou couture avec un circuit flexible

Nous avons développé un T-shirt intelligent dans le cadre du projet ETexWeld en collaborant avec l'équipe de TTRI. Ce T-shirt a été initialement créé pour détecter le mouvement et l'état physiologique du porteur (pompier), ce qui est différent par rapport au prototype développé avec l'équipe TEIP dans le même projet ; nous avons donc choisi le PCB flexible qui est plus compatible avec la structure textile et les technologies de broderie et de couture pour la mise en œuvre.

3.2.1 Prototype de T-shirt intelligent à base de PCB flexible en polyimide

La technologie de broderie implique l'utilisation des fils conducteurs à base de polymère en position aiguille de couture en raison de leurs propriétés mécaniques (souplesse et élasticité). Les fils 100% métalliques tels que les fils en acier inoxydable ne peuvent être utilisés qu'en position de canette (bobine). Les composants électroniques sont soudés sur un PCB flexible ou semi-flexible, puis les connexions entre ces composants et les capteurs, les électrodes ou les actionneurs sont réalisées par un contact physique entre le fil conducteur et le pad du PCB. Si le fil conducteur ne peut être utilisé qu'en position de canette, comme le fil d'inox, il est difficile de créer ce contact physique. Il existe toutefois quelques produits commerciaux de fil conducteur qui peuvent être utilisés en position aiguille. Par conséquent, ce type de produit est compatible avec la technologie de la broderie ou de la couture. La faisabilité et la fiabilité de la broderie avec le fil conducteur ont déjà été étudiées [77], [78], mais sans l'utilisation des PCBs flexibles.

Dans notre étude, nous avons utilisé un PCB flexible en polyimide pour réaliser un circuit avec un microcontrôleur et des capteurs pour surveiller les activités (mouvements) du porteur, la température et l'humidité de sa peau (Figure 34). Tous les composants ont été soudés sur un côté du PCB flexible. Le microcontrôleur utilisé est « Simblee RFD77101 » qui possède un module de communication BLE (Bluetooth Low Energy). De plus, un capteur ECG (ADS 1292R,

Texas Instruments), a été connecté au microcontrôleur via la liaison SPI (Serial Peripheral Interface), pour capter les signaux d'ECG et de respiration. Un accéléromètre (MPU-6050, TDK InvenSense) a été connecté via le bus I²C (Inter Integrated Circuit). Ce composant électronique peut également capter la température et l'humidité. Le schéma du circuit est présenté sur la Figure 38. Toutes les données sont transmises à un téléphone par le protocole Bluetooth et puis au serveur en utilisant les communications WiFi ou 4G. Les connexions entre le PCB flexible et les électrodes textiles sont réalisées par le fil conducteur à base de polyamide (Shieldtex 234/34-2 ply HCB, Statex). La résistance linéaire du fil conducteur est d'environ 100 Ω/m. Il est utilisé dans en position aiguille de couture et canette pour améliorer la résistance linéaire des pistes conductrices ainsi réalisées. Les technologies de broderie et de couture, bien connues ont ainsi été utilisées. Les électrodes textiles ont été réalisées par un tricot textile à base de fil conducteur ou ont été directement brodées sur la structure textile. Enfin, afin de protéger le prototype contre le processus de lavage, le polymère PDMS (polydiméthylsiloxane) (Sylgard 184, Dow Corning) et le film TPU sont utilisés pour encapsuler le circuit et le fil conducteur.

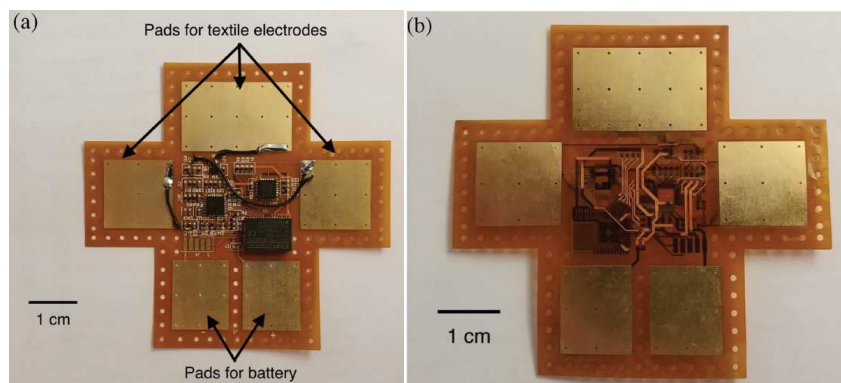


Figure 37 : Photos du PCB flexible. (a) Face avant. (b) Face arrière.

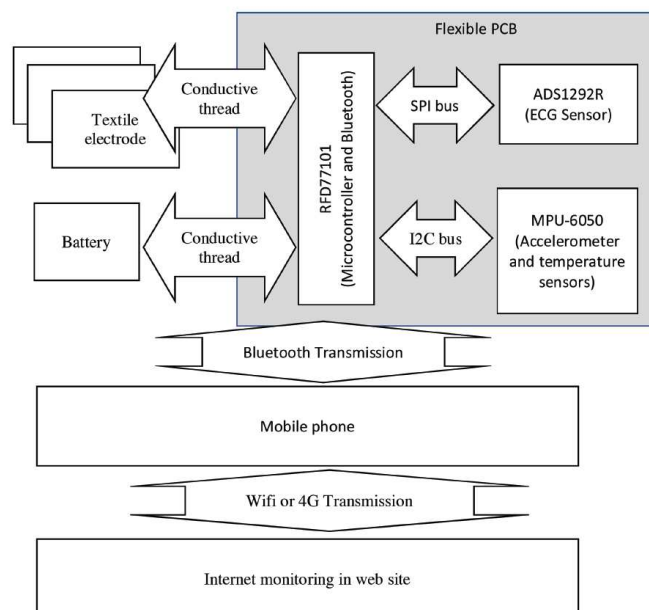
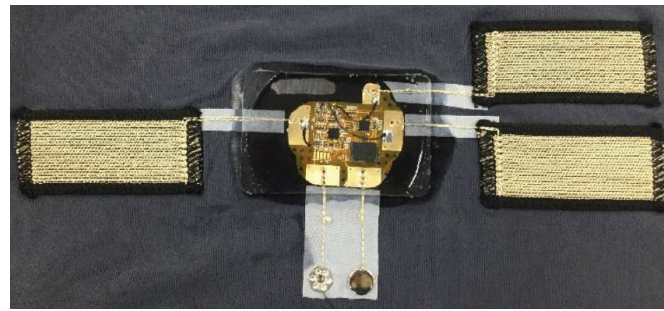


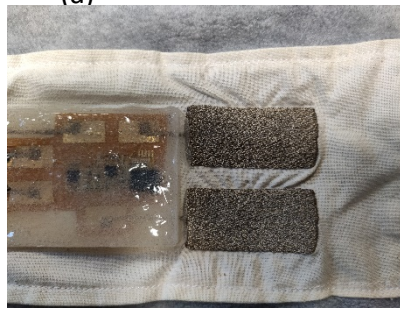
Figure 38 : Schéma du circuit de prototype de T-shirt intelligent.



(a)



(b)



(c)

Figure 39 : Photos de prototype T-shirt. (a) Vue inférieure. (b) Vue extérieure. (c) Prototype avec les électrodes réalisées par broderie.

La procédure de mise en place du circuit et des électrodes est illustrée sur la Figure 38. Un film TPU double face a d'abord été collé sur le côté intérieur du T-shirt en utilisant un fer à repasser. Ensuite, le circuit avec les composants électroniques soudés a été posé sur la surface adhésive du film TPU. Les électrodes textiles ont été cousues sur le T-Shirt avec le point zigzag pour maintenir l'élasticité de la structure textile du devant du T-shirt. Après avoir cousu le fil conducteur entre les électrodes textiles et le circuit électronique, nous avons mis en place un film TPU dessus pour le protéger. A la fin du processus de fabrication, le PDMS a été utilisé pour encapsuler le circuit électronique et le protéger contre l'humidité et les contraintes mécaniques tout en assurant un certain niveau de flexibilité et du confort au porter. Les étapes c et d auraient pu être simplifiées en utilisant la technique de broderie. Les connecteurs de batterie ont été réalisés par les boutons de pression. Pendant le test de lavage, la batterie doit être détachée.

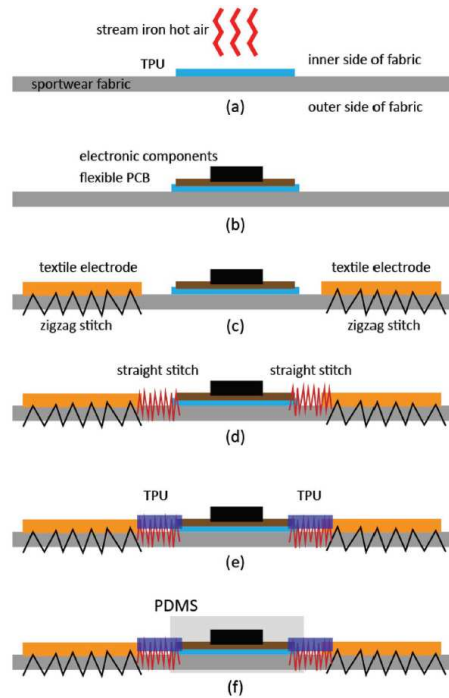


Figure 40 : Procédure de mise en place du circuit et des électrodes textiles dans une structure textile. (a) Adhésion du film TPU sur le côté inférieur du support textile. (b) Adhésion du circuit électronique. (c) Mise en place des électrodes textiles. (d) Mise en place du fil conducteur entre les électrodes et le circuit. (e) Protection du fil conducteur par le film TPU. (f) Encapsulation du circuit par PDMS.

Avec la protection PDMS du circuit électronique et par le film TPU des pistes conductrices (circuit imprimé textile), ces prototypes peuvent tenir jusqu'à 30 cycles de lavage dans une machine à laver domestique en cycle « rapide ». Toutefois, certains prototypes ne fonctionnaient plus après 30 cycles de lavage. La plupart des défaillances ont été dues au décollage des composants électroniques sur le PCB flexible.

3.2.2 Réalisation du modèle de classification pour le T-shirt

Afin de détecter et identifier le mouvement du porteur, nous avons développé un système de classification automatique. Un panel de cinq personnes (3 femmes et 2 hommes âgés de 20 à 30 ans) a été organisé pour réaliser les modèles de détection. Six mouvements d'activité différents (Tableau 15) ont été répétés. Les personnes ont fait des mouvements d'activité 1-4 pendant 1 min pour chacun. Les mouvements d'activité 5 et 6 sont répétés 10 fois pour chacun. Lors de l'analyse des données, un filtre médian (3 longueurs) a été utilisé afin d'éliminer le bruit. Un filtre passe-haut (0,25 Hz) a été utilisé afin d'éliminer l'influence de la gravité. 8 caractéristiques ont été extraites des données filtrées de l'accéléromètres sur une fenêtre sans chevauchement de 3 secondes. Elles sont présentées dans le Tableau 16. Trois modèles de classification (arbre de décision C4.5, classification naïve bayésienne, réseau de neurones artificiels) ont été comparés et une validation croisée huit-fois a été utilisée pour les tests.

Un programme compatible Android a été développé pour le téléphone mobile, afin de recevoir et d'afficher les signes vitaux et les mouvements d'activité. Un site web et un programme en PHP ont été développés afin d'afficher et de surveiller les données (Figure 41).

Tableau 15 : Listes des mouvements d'activité.

Numéro de mouvement	Activité
1	Standing
2	Walking
3	Running
4	Crawling
5	Lateral falling
6	Falling

Tableau 16 : 8 caractéristiques extraites depuis les données filtrés de l'accéléromètre.

Numéro de caractéristiques	Description
1	Dépenses d'énergie (Équation 3)
2-4	Ecart-type de X, Y et Z axes
5-7	Moyenne de X, Y et Z axes
8	Pente (Équation 4)

$$\text{Dépense d'énergie} = \int |x|^2 + \int |y|^2 + \int |z|^2 \quad \text{Équation 3}$$

$$\text{Pente} = \sqrt{(x_{max} - x_{min})^2 + (y_{max} - y_{min})^2 + (z_{max} - z_{min})^2} \quad \text{Équation 4}$$

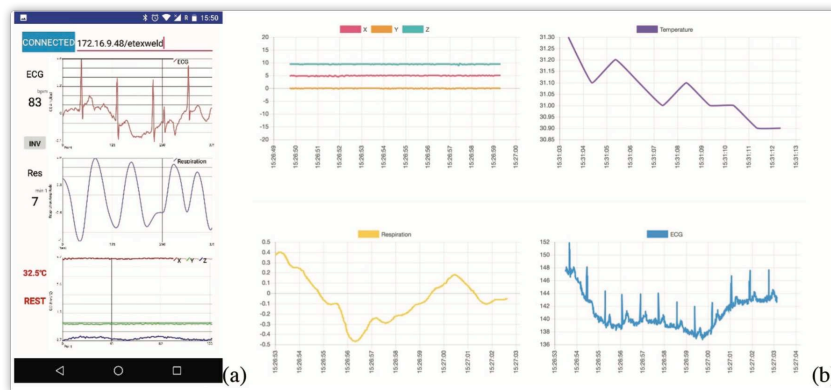


Figure 41 : Interface de programme (a) Android et (b) Site web.

Le Tableau 17 montre la précision des modèles après huit tests de validation croisée. Ces trois modèles obtiennent une précision élevée. Nous avons constaté que l'arbre de décision atteint un écart type inférieur. Selon la complexité de la programmation, l'arbre de décision a été utilisée pour le programme Android du téléphone intelligent et le programme de site web. La Figure 42a montre la précision pour chaque cycle de validation croisée. La Figure 42b illustre la structure de l'arbre de décision pour la détection du mouvement d'activité. Dans chaque nœud, le chiffre (x1, x2, etc.) représente le numéro de la caractéristique de 1 à 8 du Tableau 16. Le chiffre dans la position de la feuille représente le mouvement d'activité du Tableau 15.

Tableau 17 : Précision de modèle de classification.

Modèle de classificateur	Précision	
	Moyenne	Écart-type
Arbre de décision	96,36%	4,35%
Classification naïve bayésienne	95,79%	7,72%
Réseau de neurones artificiels	95,67%	5,09%

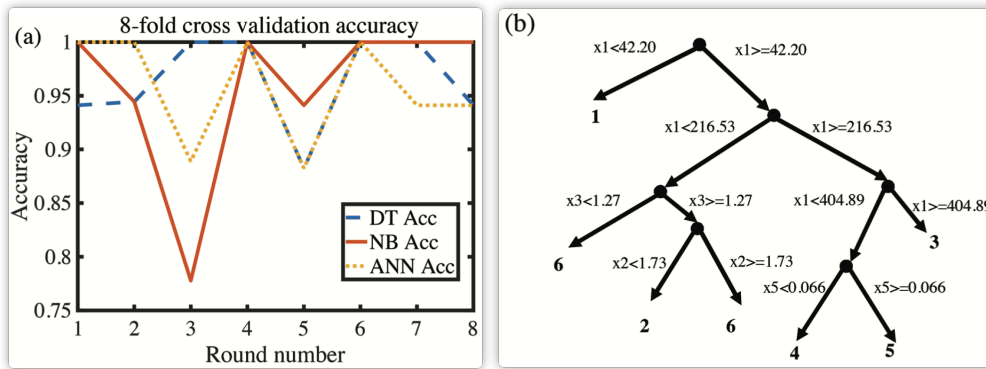


Figure 42 : (a) L'évolution de la précision pendant la validation croisée. (b) Le modèle de l'arbre de décision.

3.2.3 Prototype de circuit flexible en polyester

En plus d'utiliser le PCB flexible en polyimide, nous avons aussi testé la faisabilité sur un circuit flexible à base de polyester enduit d'argent, tel que repris dans le cadre de la thèse d'Amale ANKHILI. Ce circuit a été fabriqué par le laboratoire « Centre de Microélectronique de la Provence » situé à Gardanne appartenant à l'École des Mines de Saint Etienne. Il est composé d'un substrat en polyester (50 μm) avec des connexions en aluminium (9 μm), sur lequel sont assemblées les LEDs. La largeur des pads est de 5 mm.

Pour assembler ce circuit sur une structure textile et réaliser les connexions, nous avons d'abord brodé un contour de circuit avec un fil ordinaire. Une fois ce contour brodé, nous avons collé ce circuit par un TPU double face. La brodeuse perce et brode le fil conducteur sur les pads du circuit flexible (Figure 43a). Le motif le plus judicieux à broder au niveau des pads est celui en 2 zigzags car un seul fil n'est pas suffisant. Néanmoins, plus on augmente le nombre de fils plus on risque d'abîmer le module par perforation de l'aiguille (Figure 43b).

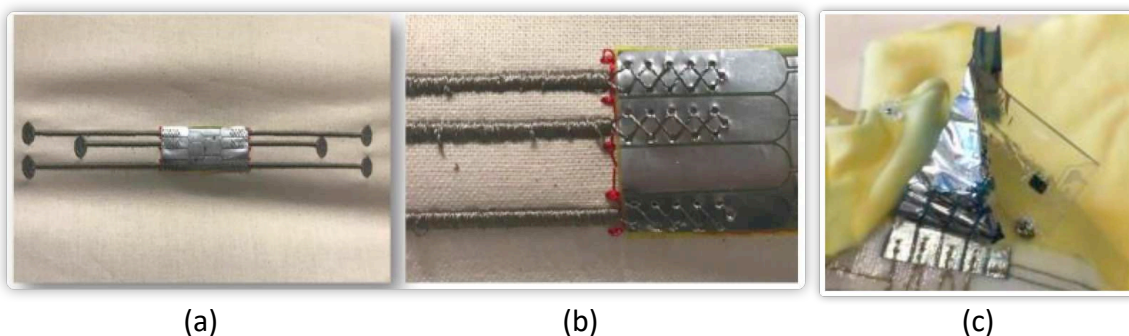


Figure 43 : (a) Module connecté aux électrodes brodées. (b) Pads connectés par broderie. (c) Mauvaise adhésion du PDMS à l'aluminium après un seul cycle de lavage.

Nous avons essayé de l'encapsuler en utilisant le PDMS à l'aide d'un moule en téflon que nous avons conçu. Avant lavage, le prototype a bien fonctionné avec toutes les LEDs allumées. En revanche, après un seul cycle de lavage le PDMS s'est détaché dû à la mauvaise adhésion entre l'aluminium et le PDMS. (Figure 43c)

3.3 Connexion par soudure

L'avantage de l'utilisation d'un circuit flexible réside dans le fait que nous pouvons intégrer un circuit double couche pour intégrer les composants électroniques par soudure avant de

réaliser un circuit complexe. Ce circuit est compatible avec les techniques industrielles textiles, comme la couture et la broderie. Cependant, le circuit par lui-même influence la propriété d'élasticité de la structure textile. De plus, même si les fils conducteurs à base de polymère sont utilisés dans la position d'aiguille, la partie contact sera lâche pendant l'utilisation impliquant les soucis de fiabilité. De ce fait, ce type de contact se traduit par une résistance électrique de contact élevée, voir une rupture de contact. Ainsi, logiquement la prochaine étape dans le domaine d'intégration des composants électroniques consistait en le développement d'un fil conducteur compatible avec les techniques de couture et de broderie. De plus, les composants électroniques pouvant être soudés directement sur ce fil, les circuits ainsi fait devraient présenter un degré de fiabilité plus important. Ces travaux sont menés dans le cadre du projet LUMINOPTX (EU Interreg V) avec une post-doc.

3.3.1 Réalisation et caractérisation des fils adaptés à des métamatériaux

Des fils conducteurs ont été produits par assemblage de fils synthétiques standards et de fils conducteurs. (Figure 44) Ces fils nouvellement développés sont constitués d'un cœur (core yarn), de fil conducteur en cuivre (copper wires) et éventuellement d'un fil de couverture (cover yarn). La partie conductrice est avantageusement constituée de multifilaments de cuivre (12 x 30 μm et 30 x 20 μm , Elektrisola, Switzerland). Le cœur est fait à base de monofilament de PTFE (Polytetrafluoroéthylène) (Lenzing Plastics GmbH, Austria). Le fil de couverture possède une structure multifilament en polyester. Ce fil sert à minimiser la friction entre le multifilament en cuivre et les pièces métalliques de la machine. Par conséquent, ce fil est compatible avec les techniques de couture et de broderie.

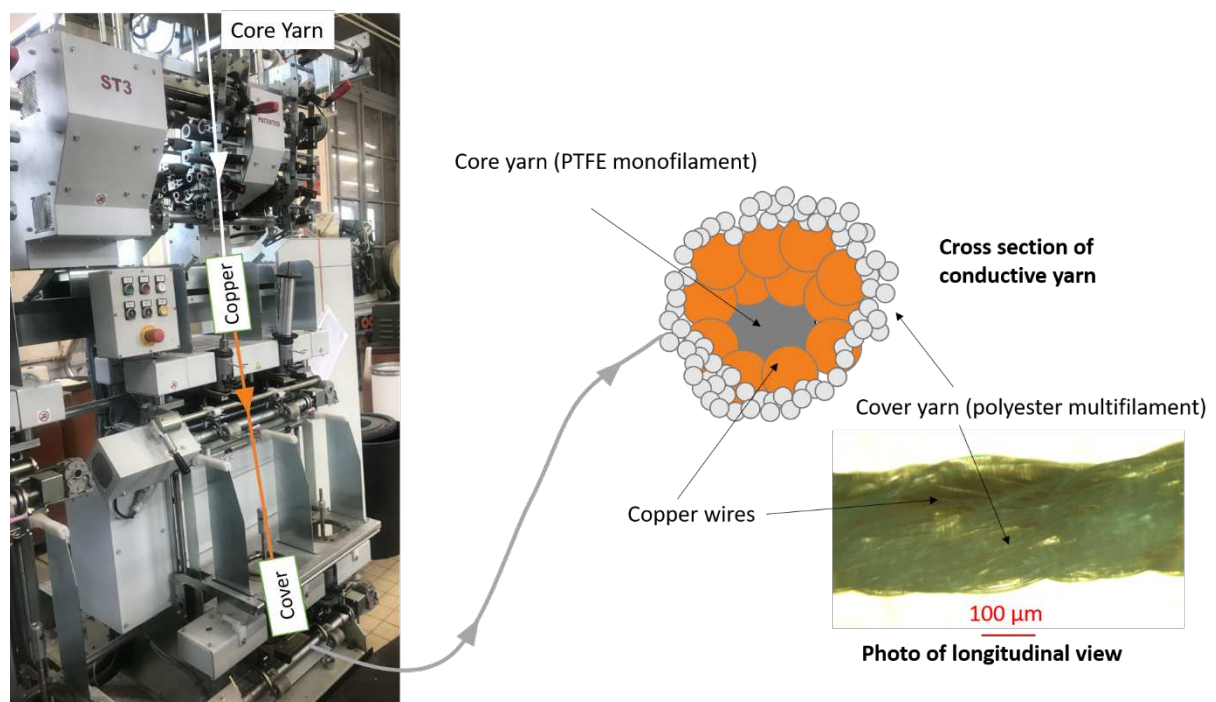


Figure 44 : Représentation schématique des fils assemblés.

Afin d'étudier les propriétés mécaniques de ce nouveau fil conducteur, nous l'avons testé dans un banc de traction en le comparant avec les fils conducteurs commerciaux à base de polymère (HC40 Maderia, Shieldex 117/17-2 ply HCB Statex et Datatrans yarn Tibetch) et le fil ordinaire en polyester (135X2 dtex, Gunold). Les fils Maderia et Shieldex sont les

multifilaments en polyamide plaqués en argent, qui peuvent être utilisés en position aiguille dans une machine à coudre ou brodeuse. Le fil provenant de la société Tibtech se compose des multifilaments en cuivre, polyamide et polyester, qui ne peut être utilisé que dans la position de canette.

Les résultats des mesures ont été donnés sur la Figure 45. Le « core yarn » est le monofilament en PTFE utilisé comme cœur pour notre nouvel fil. Le fil « Yarn A » est le nouveau fil conducteur développé avec les multifilaments de cuivre 12X30 μm (12 multifilaments de 30 μm chacun) et le fil « Yarn B » est le nouveau fil développé avec les multifilaments de cuivre 30X20 μm .

Selon les résultats présentés, nous avons pu constater que nos nouveaux fils ont des propriétés mécaniques similaires au monofilament en PTFE, en tout début de traction. Les multifilaments de cuivre rendent ces nouveaux fils plus résistants et moins élastiques. Leur module de Young est plus élevé que celui des fils conducteurs commerciaux, car le fil de cuivre n'est pas flexible en raison de sa nature métallique et il a un faible pourcentage d'allongement par rapport aux autres fils. Même si les nouveaux fils conducteurs ne présentent pas des performances similaires à celles du fil ordinaire, leurs Module de Young est proche de celui du fil ordinaire. (Tableau 18) Par conséquent, ils sont compatibles avec l'utilisation dans une machine à coudre ou dans une brodeuse.

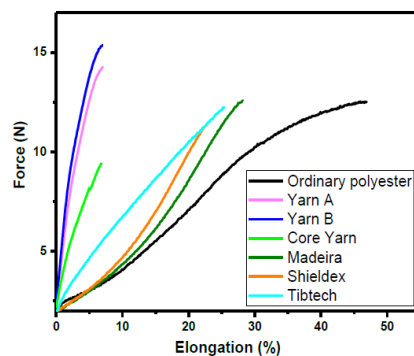


Figure 45 : Courbe de résultat de mesure sur le banc de traction.

Tableau 18: Résultat de caractéristique de traction.

Nom de fil	Diamètre (mm)	Rupture (%)		Module de Young (GPa)	
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Ordinary polyester	0,15	39,56	1,6	4,2	0,5
Core yarn	0,11	9,89	1,4	17,71	1,0
Madeira	0,20	38,17	1,1	2,27	0,1
Shieldex	0,18	32,74	0,8	2,46	0,1
Tibtech	0,38	32,04	2,1	0,46	0,03
Yarn A	0,23	8,72	0,6	7,21	0,2
Yarn B	0,28	8,64	0,6	5,94	0,4

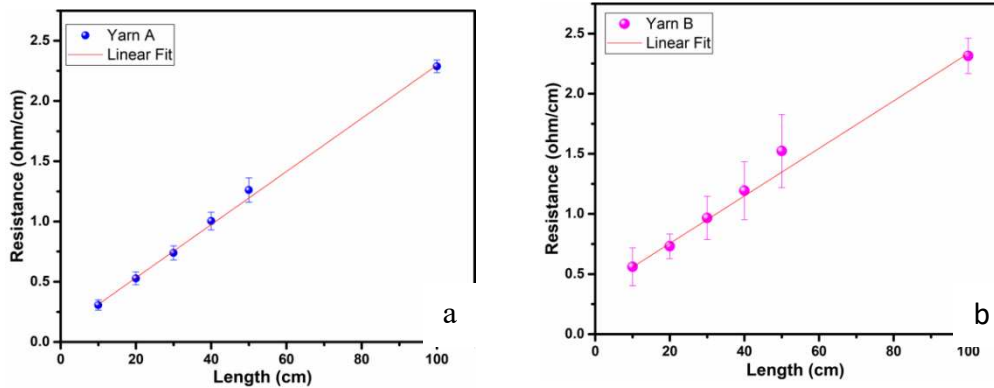


Figure 46 : Mesures de résistance linéique et régression linéaire pour le fil obtenu à partir du multifilament de cuivre (a) 12 x 30 µm et (b) 30 x 20 µm.

Les fils fabriqués à partir des multifilaments de cuivre 12 x 30 µm (yarn A) et 30 x 20 µm (yarn B) possèdent les mêmes résistances linéiques environ 2,3 Ω/m (Figure 46). Les écarts types des mesures sont faibles, car les filaments sont non émaillés. La résistance linéique pour le fil Shieldex est 247 Ω/m, pour le fil Madeira est 114 Ω/m et pour Tibtech est 2.4 Ω/m.

Afin de tester la compatibilité des fils développés avec les techniques traditionnelles textiles, nous avons utilisé une brodeuse industrielle pour réaliser quelques motifs. (Figure 47) Les broderies tests ne montrent que très peu de défauts et le visuel est très proche d'un fil standard ouvrant la possibilité à la broderie de motifs plus complexes.

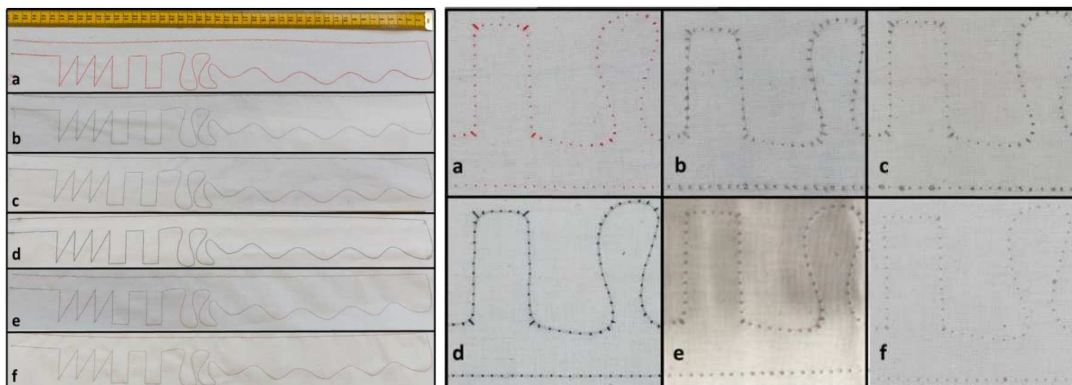


Figure 47 : Performance de broderie. (a) fil ordinaire, (b) Madeira, (c) Shieldex, (d) Tibetch (dans la canette) (e) Fil A (f) Fil B. (Gauche) côté supérieure (Droite) côté inférieure.

3.3.2 Intégration des composants électroniques par soudure

L'utilisation de filaments non émaillés a également pour avantage de faciliter la soudure post broderie pour l'inclusion des LEDs, par exemple. La Figure 48a montre la broderie du logo « ensait » avec une LED soudée sur le fil obtenu à partir des multifilaments de cuivre 12x30 µm.

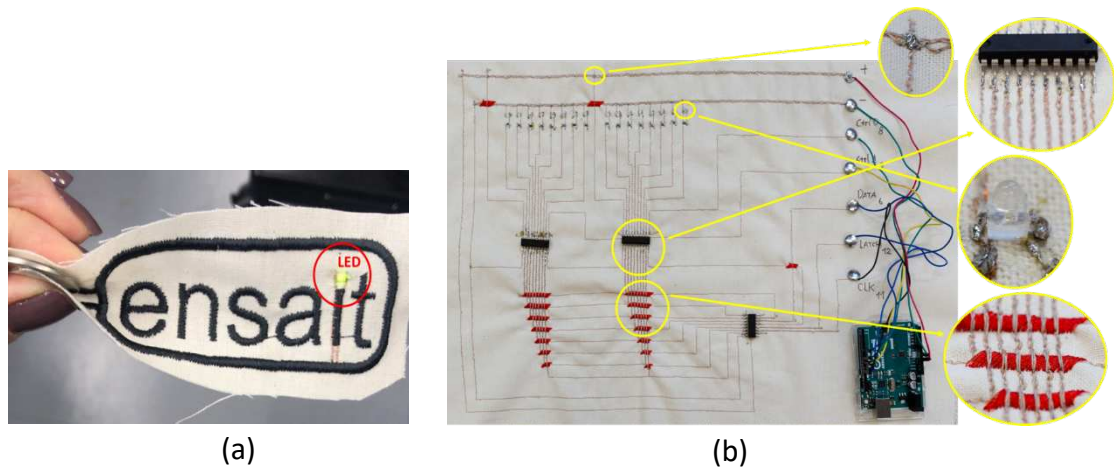


Figure 48 : (a) Broderie du logo "ensait" avec LED directement soudée. (b) Circuit brodé avec 16 LEDs et trois composants électroniques directement soudés

La Figure 48b montre la broderie du circuit électrique avec les fils de multifilaments de cuivre 12x30 μm . 16 LEDs (VLD 1232G) sont directement soudées sur le fil après broderie. Les composants électroniques (2 verrous SN74HCT573N et 1 série vers parallèle SN74HC595N) sont directement soudés sur le fil également. 7 boutons pressions sont utilisés pour connecter ce circuit au microcontrôleur Arduino Uno. Un fil à broder classique (polyester, en rouge) est utilisé pour réaliser des « ponts » entre les fils croisés afin d'éviter les courts-circuits.

L'avantage de ce nouveau fil développé réside dans le fait qu'il est possible de l'utiliser en position aiguille de la machine à coudre et de brodeuse. Par conséquent, les circuits plus complexes peuvent être réalisés. De plus, ce fil est compatible avec la technologie de soudure qui permet de réaliser une connexion fiable. Ce n'est pas seulement le composant électronique simple avec deux pads qui peut être intégré sur ce fil, mais aussi le composant avec de multiples pads (sous la forme de DIP (Dual In-line package)). Ainsi, un circuit complexe sans PCB flexible est envisageable avec ce fil sur les substrats textiles tout en maintenant les propriétés mécaniques et le confort (légèreté, flexibilité, souplesse, etc.).

4 Conclusion

Concernant des travaux menés sur l'intégration des composants électroniques dans les structures textiles, nous avons développé des prototypes en collaboration avec plusieurs partenaires, dans le cadre de plusieurs projets collaboratifs et privés.

Le premier prototype a été développé dans le cadre du projet HomoTextilus avec le PCB rigide et le fil d'inox. Ces travaux répondent aux questions de possibilité et faisabilité de l'intégration des composants électroniques au sein des structures textiles de manière non industrielle.

Afin de réaliser un prototype plus proche du monde « textile », nous nous sommes orientés vers l'utilisation de circuits souples. En collaborant avec le TTRI, nous avons fabriqué le prototype avec le film TPU et ACF. Ensuite, nous avons choisi le PCB flexible pour intégrer plusieurs composants électroniques (capteurs, microcontrôleur, etc.) afin de créer un système complexe. Les technologies de couture et de broderie sont compatibles avec le support PCB flexible. En raison du fait que le PCB flexible influence le toucher de la structure textile, nous avons testé également le film PET enduit par aluminium. Cependant, nous avons constaté que

les propriétés mécaniques de ce support ne résistent pas aux dommages pendant le lavage, même lorsque ce support est encapsulé par le silicone.

Le dernier travail de ce chapitre répond aux besoins des compatibilités avec la structure textile et la fiabilité de connexion des composants électroniques. Le fil adapté aux métamatériaux a été développé par filature de fils synthétiques ordinaires et de fils conducteurs. Avec le monofilament comme le cœur de ce fil et le multifilament comme le fil de couverture, ce fil est compatible avec les technologies de couture et de broderie. Avec le fil conducteur guipé, les composants électroniques peuvent être soudés sur ce fil de manière fiable. Par conséquent, un circuit complexe sans PCB flexible est envisageable, avec ce fil sur la structure textile, en maintenant ces propriétés mécaniques textiles et son confort.

Les activités sur le développement des textiles électroniques ont été valorisées par 2 publications et 4 communications en conférences scientifiques internationales.

Quatrième partie – Travaux sur la fiabilisation, la durabilité et la lavabilité des systèmes textiles intelligents

1 Introduction

Le marché des textiles intelligents augmente tous les jours et il est prévu qu'il atteigne jusqu'à 9 milliards de dollars américains en 2024 [83]. Dans la catégorie des accessoires portables, une grande partie est toujours constituée de montres et de gadgets portables, mais le pourcentage d'appareils médicaux et de vêtements intelligents augmente également de manière continue. Toutefois, les problèmes liés à la fiabilité et à la lavabilité des textiles électroniques portables peuvent présenter un frein à leur développement plus rapide.

Dans les textiles intelligents, les parties les moins textiles (microcontrôleur, capteurs, batteries, etc.) sont soit encapsulées soit détachables, pour tenter de supporter ou éviter leur lavage et l'exposition à l'eau, aux matières chimiques (détergents) et aux contraintes mécaniques existantes pendant le cycle de lavage. Les parties les plus textiles (interconnexion, électrodes, antennes, capteurs textiles, etc.) ne sont pas lavables et supportent au mieux quelques lavages (une dizaine maximum) et/ou deviennent des produits « consommables » (cas des ceintures pour la mesure de fréquence cardiaque pour le sport).

Parmi les prototypes développés dans notre laboratoire décrits dans les chapitres précédents, nous avons également mis l'accent sur leur lavabilité. Les premiers travaux traitant ce problème ont commencé dans le projet ETexWeld. Nous avons étudié la résistance linéique du fil conducteur au fil des lavages et la méthode de protection. Ensuite, dans le cadre de la thèse d'Amale ANKHILI pour le projet BtoB avec la société @Health, nous avons investigué l'amélioration du design des pistes conductrices et étudié différentes méthodes de protection contre le lavage.

Le troisième volet de cette thématique de recherche présente les travaux amorcés dans le but de comprendre les influences de différentes contraintes sur les textiles intelligents pendant le lavage. Nous nous concentrons sur les impacts de la température, de l'eau et des contraintes mécaniques.

2 Lavages des fils conducteurs

2.1 Protection par TPU

2.1.1 Tests sur les fils conducteurs polymères enduits par argent

Le premier test est mené par un lavage de 20 échantillons avec une protection par TPU. Les fils conducteurs (Shieldex 117/2 ply HBC) sont cousus sur un tissu en coton. Ensuite, ils sont couverts par le TPU en utilisant une presse à chaud (Figure 49). Les échantillons sont lavés dans une machine de lavage de laboratoire (DataColor SF600 Plus) pendant 30 min à 30°C. La vitesse de rotation est 50 RPM (révolution par minute). La mesure de résistance linéique est faite par la méthode de 4-point avec un courant de 60mA. Les résultats de lavage sont présentés dans le Tableau 19.



(a)



(b)

Figure 49 : (a) Presse à chaud. (b) Échantillon des fils conducteurs protégés par le film TPU.

Tableau 19 : Résultat de mesure de résistance linéique du fil conducteur en polymère.

Wash cycle	Contact Resistance (Ω)							
	Without TPU				With TPU			
	min	avg	max	std dev	min	avg	max	std dev
0	62	77	108	13	37	51	96	19
1	81	114	166	24	49	61	114	22
2	112	157	241	31	63	80	140	25
3	129	209	320	54	78	100	167	28
5	158	268	367	49	93	124	218	40
10	228	364	505	92	115	166	293	57
20	309	786	1260	274	120	178	275	51
30	491	1286	1817	471	167	235	405	82
40	1088	1914	2667	484	181	290	522	113
50	1087	5309	10120	2773	208	307	520	109

La Figure 50a montre l'évolution de la résistance au cours des 10 premiers cycles de lavage. Tous les échantillons possèdent le comportement d'augmentation linéaire, même pour les échantillons sans protection TPU. Après 10 cycles de lavage, les résistances des fils conducteurs sans protection du film TPU ont augmenté de façon exponentielle avec les cycles de tests de lavage. En attendant, pour les échantillons avec la protection TPU, leurs résistances électriques augmentaient linéairement avec les cycles de lavage. Lors de tous les tests de lavage, les résistances des échantillons sans TPU sont toujours supérieures à celles des échantillons avec la protection TPU. La Figure 50b montre que les résistances pour les échantillons avec la protection TPU arrivent à un niveau stable et augmentent légèrement ; pendant ce temps, les résistances des échantillons sans la protection TPU continuent d'augmenter.

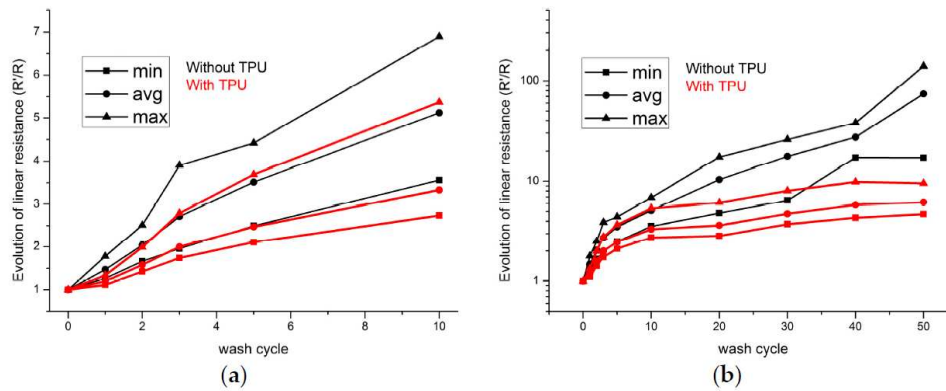


Figure 50 : Évolution de résistance électrique des fils conducteurs polymères enduits par argent. (a) De 0 à 10 cycles de lavage. (b) De 0-50 cycles de lavage.

Après 50 cycles de lavage, la valeur de résistance moyenne du fil conducteur sans protection augmente jusqu'à plus de 69 fois par rapport à sa valeur initiale. L'écart-type de la valeur de résistance pour les échantillons sans TPU est aussi élevé (2773 Ω/m après 50 cycles de lavage). Comme pour les échantillons avec la protection TPU, la valeur moyenne de la résistance linéique est dans la plage acceptable de 51 Ω/m (avant lavage) à 307 Ω/m (après 50 cycle de lavage). L'écart-type est de 109 Ω/m après 50 cycles de lavage. La valeur de résistance initiale inférieure pour l'échantillon avec TPU peut être expliquée par l'augmentation de la surface de contact et de la pression de contact entre les filaments à l'intérieur du fil sous la pression du film TPU.

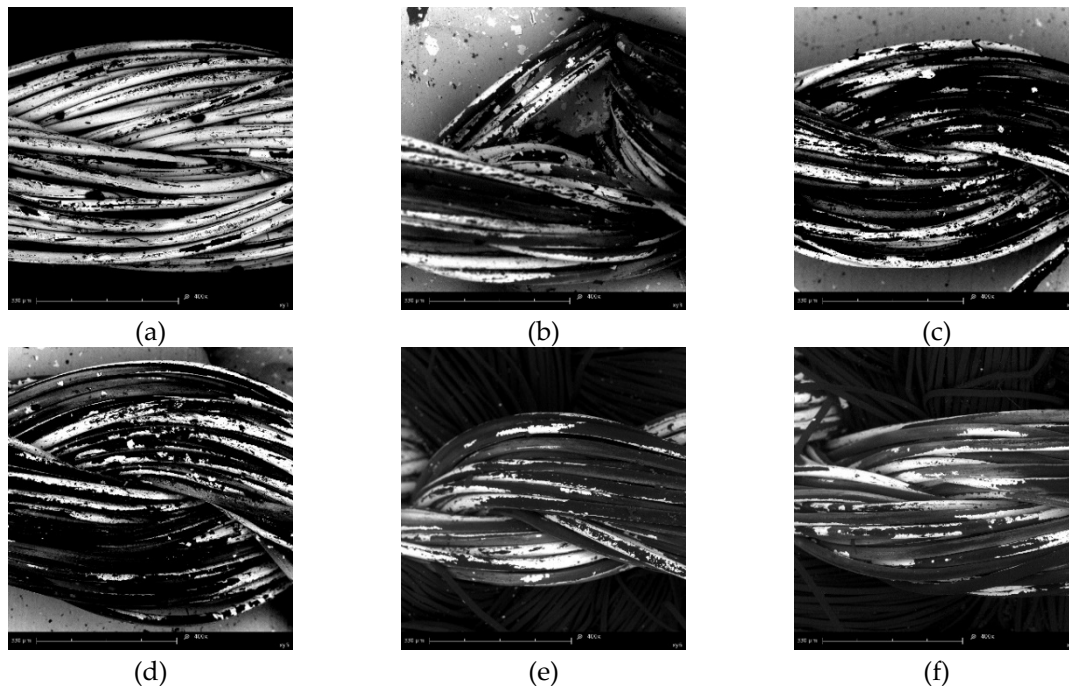


Figure 51 : Image de MEB pour les fils conducteurs sans protection TPU après le test de lavage. (a) Avant de lavage. (b) 5 cycles de lavage. (c) 10 cycles de lavage. (d) 20 cycles de lavage. (e) 40 cycles de lavage. (f) 50 cycles de lavage.

Afin de comprendre la forte augmentation des résistances du fil, la mesure MEB (microscopie électronique à balayage) a été réalisée. Comme le montre la Figure 48a, quelques pelures de zones de plaque d'argent peuvent être observées, même si le fil n'est pas lavé. Cette défaillance du revêtement provient du mouvement mécanique pendant le processus de

couture. Avec l'augmentation du nombre de cycles de lavage, de plus en plus d'argent plaqué est détruit par les mouvements mécaniques (flexions, frottements, etc.) lors du lavage (Figure 48b-f). Après 50 cycles de lavage, le matériau en argent peut rarement être observé sur la surface extérieure du fil. Cela peut expliquer les mauvais résultats de conductivité des fils lavés non protégés et les améliorations obtenues lors de l'utilisation du TPU.

Il convient de mentionner que, même lorsque la température a été élevée de 180 °C pendant le processus de transfert avec la presse à chaud, l'argent plaqué sur la surface du filament n'a pas été endommagé en raison du temps de fonctionnement court.

2.1.2 Tests sur les fils conducteurs en cuivre nickelé

Nous avons testé également les multifilaments conducteurs en cuivre nickelé. La Figure 52 montre l'évolution de leurs résistances lors des tests de lavage. Les valeurs de résistances de tous les échantillons sont presque constantes, même pour les échantillons sans protection TPU. Tous les échantillons sans TPU et avec TPU peuvent être mesurés après 50 tests de lavage. Les valeurs moyennes des résistances vont de 4,12 Ω/m à 4,49 Ω/m pour les échantillons sans TPU et de 4,21 Ω/m à 4,63 Ω/m pour les échantillons avec TPU, comme dans le Tableau 20. Le résultat montre que la structure des multifilaments est suffisamment résistante pour éviter la destruction provoquée par les mouvements mécaniques lors du lavage. Par conséquent, les valeurs de résistances ne sont pas significativement différentes entre celles des échantillons sans TPU et avec TPU.

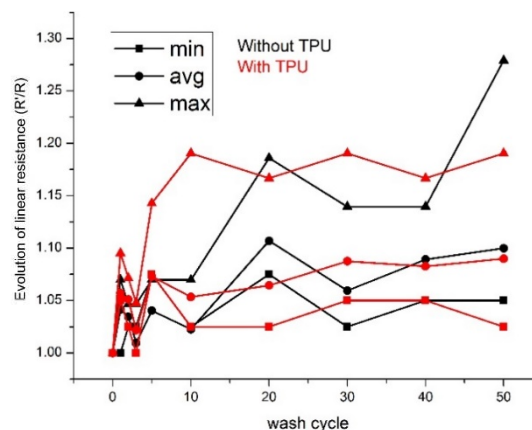


Figure 52 : Évolution de la résistance électrique de multifilaments en cuivre nickelé.

Tableau 20 : Résultat de mesure de la résistance linéique des multifilaments en cuivre nickelé

Cycle de lavage	Resistance (Ω/m)							
	Sans TPU				Avec TPU			
	min	moy	max	écart-type	min	moy	max	écart-type
0	4,00	4,21	4,30	0,09	4,00	4,12	4,20	0,07
1	4,00	4,38	4,60	0,14	4,20	4,35	4,60	0,11
2	4,10	4,35	4,50	0,10	4,10	4,33	4,50	0,13
3	4,10	4,25	4,50	0,13	4,00	4,21	4,40	0,12
5	4,30	4,38	4,60	0,08	4,30	4,42	4,80	0,13
10	4,10	4,30	4,60	0,14	4,10	4,34	5,00	0,25
20	4,30	4,66	5,10	0,25	4,10	4,38	4,90	0,19
30	4,10	4,46	4,90	0,21	4,20	4,48	5,00	0,20

40	4,20	4,58	4,90	0,22	4,20	4,46	4,90	0,19
50	4,20	4,63	5,50	0,32	4,10	4,49	5,00	0,24

La Figure 53 montre des images d'échantillons après le lavage. Avec ou sans TPU, ces multifilaments sont toutes intacts dans tous les cycles des tests de lavage. Cependant, il est possible d'observer que les filaments sont cassés pour les échantillons sans TPU après 50 cycles de lavage. Par conséquent, le TPU est toujours utile pour la prévention de la casse des filaments.

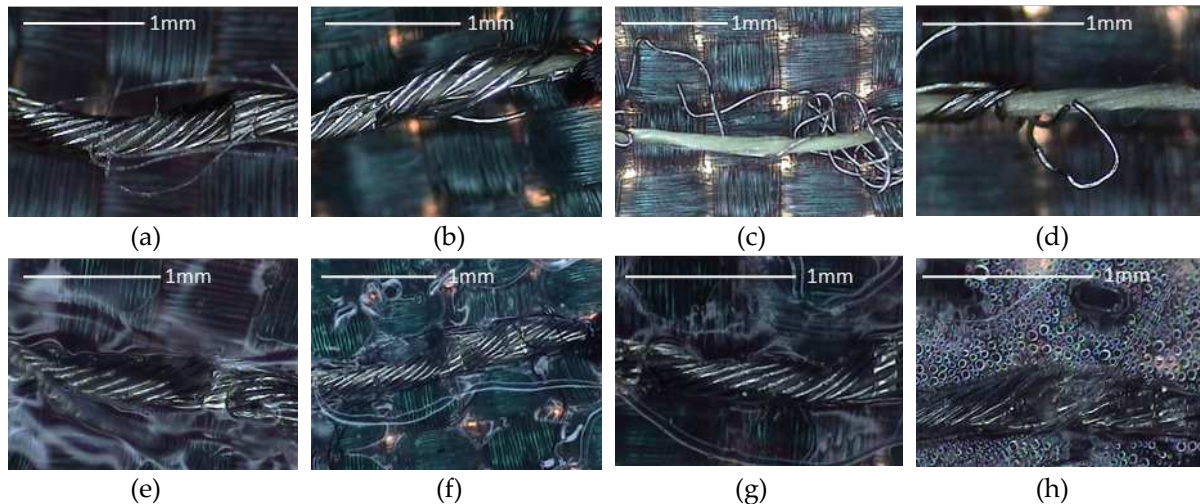


Figure 53 : Images des multifilaments en cuivre nickelé (a) Avant lavage sans TPU. (b) 5 cycles de lavage sans TPU. (c) 20 cycles de lavage sans TPU. (d) 50 cycles de lavage sans TPU. (e) Avant lavage avec TPU. (f) 5 cycles de lavage avec TPU. (g) 20 cycles de lavage avec TPU. (h) 50 cycles de lavage avec TPU.

Comparé au fil de polymère enduit par argent, le multifilament en cuivre nickelé possède la meilleure performance en termes de la résistance linéique. Même en l'absence de protection, la valeur de résistance est toujours presque la même que la valeur initiale. Il est également moins flexible et il ne convient ni à la structure tricotée ni aux technologies de couture et de broderie pour une production en masse. Ils peuvent toutefois être utilisés dans les structures tissées pour des applications nécessitant un fort courant.

2.2 Protection par broderie

Suite à l'acquisition d'une brodeuse industrielle, nous avons choisi la technologie de broderie pour la réalisation des protections du fil conducteur. Ces travaux sont menés dans le cadre de thèse d'Amale ANKHILI. Afin d'améliorer la conductivité des pistes conductrices brodées, nous avons utilisé trois motifs en zigzag (Figure 54), car la résistance des pistes réalisées par un seul fil conducteur en polymère est très élevée par rapport aux fils adaptés aux métamatériaux. Nous avons choisi un motif en 2 et en 3 zigzags. Le troisième motif se compose de 1 zigzag et du satin. Deux types de fil conducteur sont utilisés : Shieldex 117/2 ply dtex HCB et Madeira H40. Pour chaque type de fil, l'étude consiste à broder 10 pistes conductrices pour chaque motif conçu (2 zigzags, 3 zigzags et double couche). Chaque piste conductrice a une longueur de 200 mm. La consommation en fil conducteur est respectivement de 0,97 m, 1,37 m et 5,30 m pour 2 zigzags, 3 zigzags et double couche.

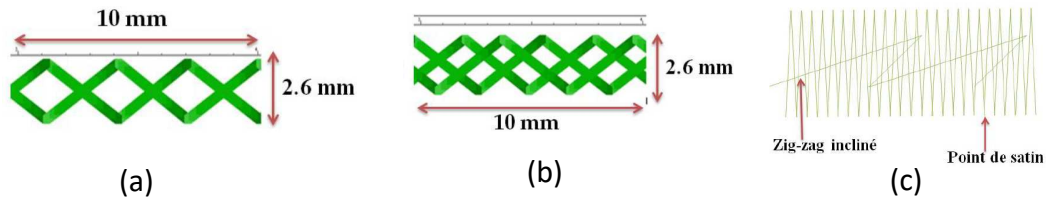


Figure 54 : Motifs de zigzag bordés (a) 2 zigzags (b) 3 zigzags (c) Double couche (1 zigzag + satin)

Afin de fiabiliser les connexions notamment au niveau du lavage, nous avons investigué deux méthodes d'encapsulation qui sont : film polyuréthane thermoplastique (TPU) pour couvrir les pistes brodées et un fil non-conducteur (couverture) brodé au-dessus de la piste.

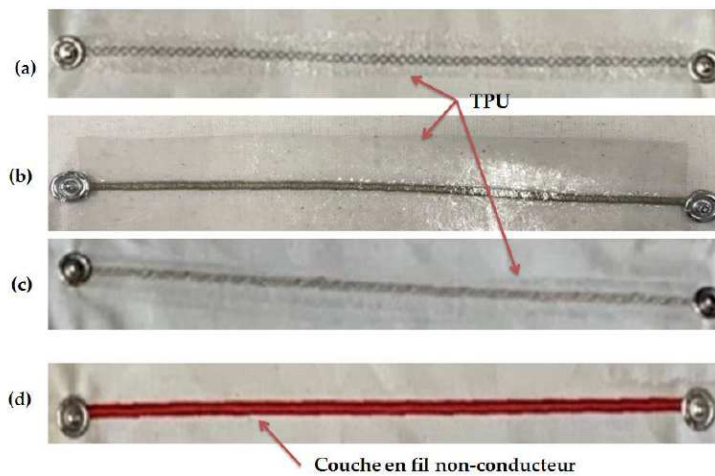


Figure 55 : Pistes conductrices encapsulées. (a) 2 zigzags protégés par TPU. (b) Double couche protégée par TPU (c) 3 zigzags protégés par TPU. (d) 2 zigzags protégés par fil non-conducteur.

La Figure 55 illustre les deux méthodes d'encapsulation utilisées pour protéger les fils contre les actions subies dans la machine à laver pendant le cycle de lavage. Cette fois-ci le lavage dans une machine à laver domestique, ce qui diffère de la section précédente où une machine à laver de labo avait été utilisée. La résistance électrique est évaluée avant et après 50 cycles de lavage, selon la norme ISO 6630.

Concernant le fil Shieldex, d'après la Figure 56a, les motifs 2 zigzags et 3 zigzags sans protection sont lavables seulement 5 fois. La résistance initiale du motif 2 zigzag est de $27,58 \pm 0,54 \Omega$ alors que celle du motif 3 zigzags est de $21,06 \pm 3,24 \Omega$. Après 5 cycles de lavages la résistance est de $175,00 \pm 56,17 \Omega$ pour 2 zigzags et $146,32 \pm 13,90 \Omega$ avec une augmentation de 84,2 % pour 2 zigzags et 85,6 % pour 3 zigzags. Le motif en double couche est lavable 50 fois sans l'aide de protection. La résistance passe de $5,48 \pm 0,84 \Omega$ avant lavage à $21,02 \pm 6,66 \Omega$ au 50ème lavage. Ce qui signifie une augmentation de 74 % après 50 lavages.

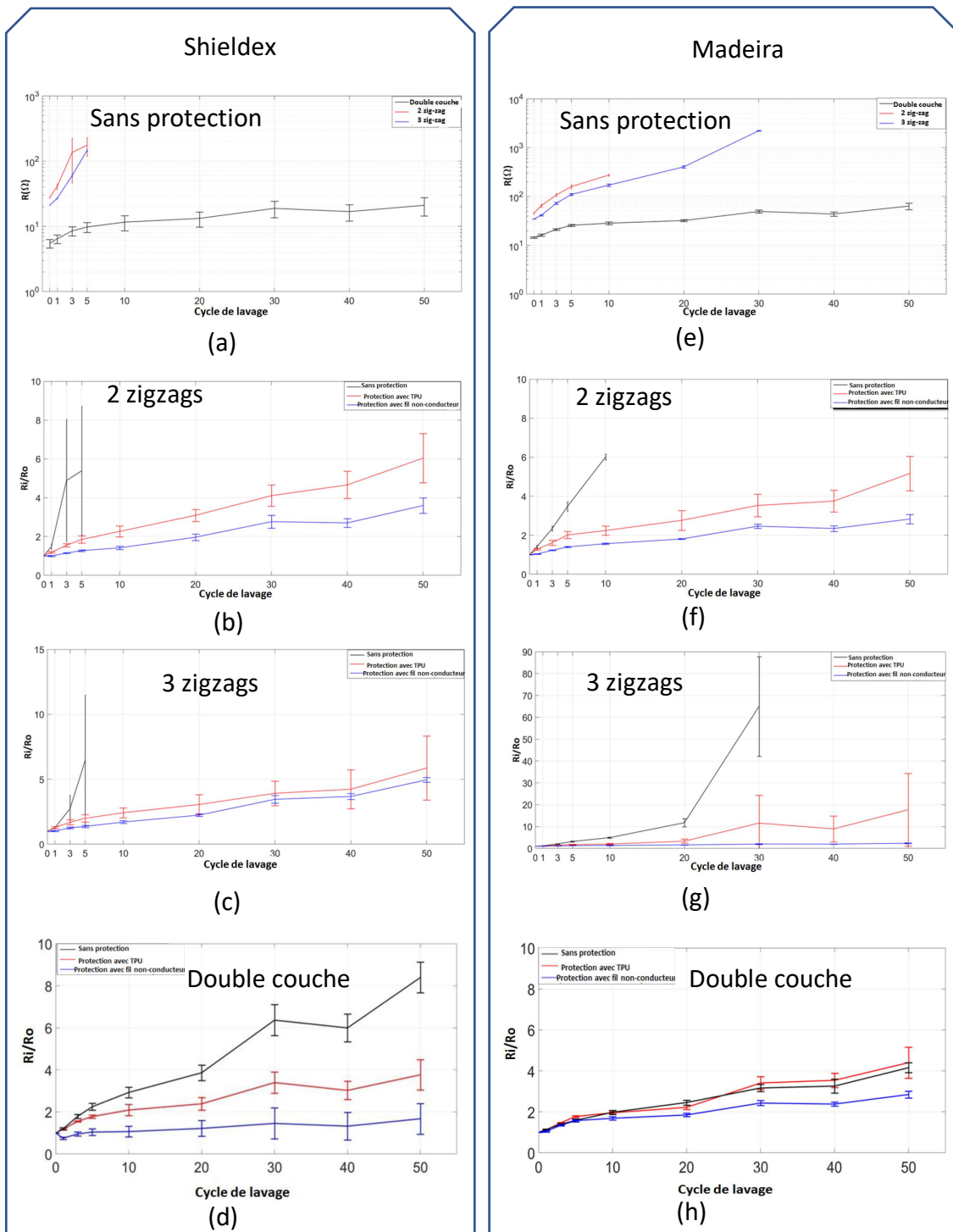


Figure 56 : Résultat de l'évolution des résistances du fil Shieldex selon le cycle de lavage. (a) Sans protection. (b) Évolution pour le motif 2 zigzags. (c) Évolution pour le motif 3 zigzags. (d) Évolution pour le motif double couche. Résultat de l'évolution des résistances du fil Madeira selon le cycle de lavage. (a) Sans protection. (b) Évolution pour le motif 2 zigzags. (c) Évolution pour le motif 3 zigzags. (d) Évolution pour le motif double couche.

Concernant le fil Madeira, (Figure 56e), sans protection, le motif 2 zigzags est lavable 10 fois alors que le motif 3 zigzags est lavable 30 fois. La résistance initiale de la piste conductrice avec le motif 2 zigzags est de $45,66 \pm 1,59 \Omega$ alors que celle du motif 3 zigzags est de $34,48 \pm$

2,23 Ω . La résistance électrique augmente de 83,3 % après 10 lavages pour le motif 2 zigzags et de 98,4 % pour le motif 3 zigzags après 30 lavages. En ce qui concerne le motif en double couche qui est 50 fois lavable, la résistance passe de $14,50 \pm 0,56 \Omega$ avant lavage à $63,00 \pm 9,58 \Omega$ au 50ème lavage. Ceci signifie une augmentation de 77 % après 50 lavages.

Si on compare les deux fils conducteurs Shieldex et Madeira, avant lavage, le fil Shieldex a la meilleure conductivité que le fil Madeira. Ceci peut être expliqué par le fait qu'il y ait plus de particule d'argent en surface du fil Shieldex. En revanche, le fil Madeira a la meilleure tenue au lavage due à la meilleure adhésion entre la couche d'argent et le fil en polyamide. La Figure 57 montre bien qu'après 50 lavages, le fil Shieldex est plus abîmé que le fil Madeira. En fait, nous avons contacté ces deux fabricants pour confirmer ce point. Le fil Madeira est fabriqué à la base du fil Shieldex en ajoutant quelques modifications pour renforcer l'adhésion des particules d'argent. Donc, la résistance initiale du fil Madeira est plus élevée que celle du fil Shieldex mais ses particules conductrices sont plus difficiles à être enlevées par le lavage.

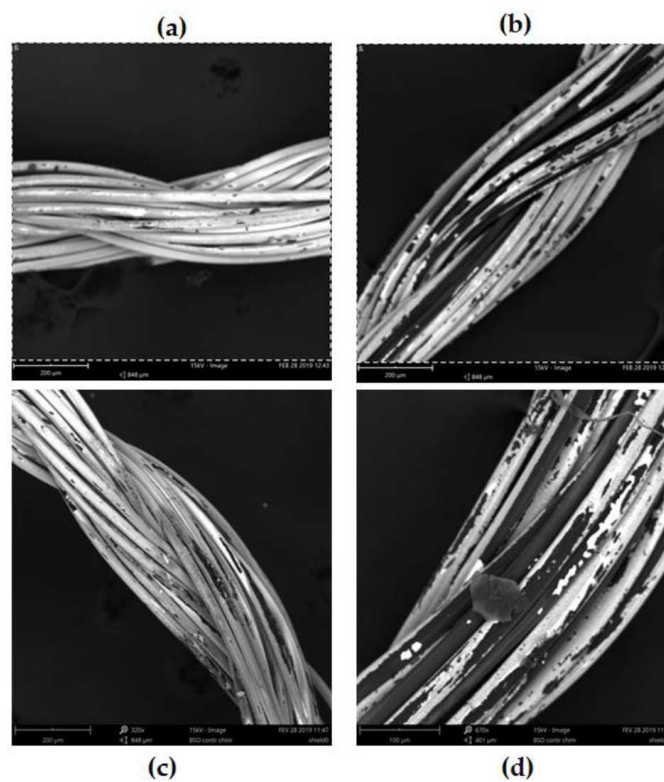


Figure 57 : Image MEB (a) Fil Madeira avant lavage. (b) Fil Madeira après 50 lavages. (c) Fil Shieldex avant lavage. (d) Fil Shieldex après 50 lavages.

Les Figure 57 b-d et f-h illustrent les évolutions des résistance linéiques pour ces deux types de fils conducteurs après le lavage. En résumé, quel que soit le motif brodé, la protection avec fil non-conducteur de couverture semble être la meilleure solution pour protéger le fil conducteur contre les détériorations subies pendant les lavages successifs. La protection avec le film TPU ne semble pas être une solution efficace pour protéger les fils conducteurs. En effet, il peut éventuellement y avoir de l'eau qui s'emmagasine entre le film et le fil conducteur qui sèche moins vite ce qui affecte négativement la résistance électrique notamment avec des pistes conductrices en double couche. De plus, la mise en œuvre du film TPU nécessite une presse chauffée à 140°C pour que le film adhère au textile. Cette température peut également abîmer les fils conducteurs.

Tableau 21 : Évolution de la résistance après 50 cycles de lavage pour les fils protégés par la technologie de broderie.

Motif	Ri/Ro après 50 cycles de lavage pour les pistes protégées par fil non-conducteur brodé	
	Shieldex	Madeira
2 zigzags	3,6 ± 0,4	2,8 ± 0,2
3 zigzags	4,9 ± 0,2	2,3 ± 0,2
Double couche	1,7 ± 0,1	2,8 ± 0,1

Le Tableau 21 présente les résistances relatives après 50 lavages des deux fils conducteurs protégés par le fil non-conducteur. Comme attendu, la bonne adhésion de la couche d'argent au polyamide fait que le fil Madeira protégé par un fil non-conducteur, possède la meilleure tenue au lavage que le fil Shieldex. Cependant, le fil Shieldex contient plus d'argent que le fil Madeira ce qui justifie, qu'après 50 lavages, la résistance relative d'une piste conductrice en double couche est plus faible pour le fil Shieldex que pour le Madeira. Si nous tenons compte de la consommation des fils, la meilleure solution pour fabriquer une piste conductrice doit être le motif 2 zigzags en utilisant le fil Madeira protégé par un fil non-conducteur brodé au-dessus.

3 Lavage des systèmes textiles intelligents

Concernant le test de lavage des prototypes textiles intelligents, les résultats sont déjà présentés dans la Section 4 de page 62 du chapitre précédent pour les Électrodes ECG textiles et la Section 3.2.1 dans ce chapitre de page 78 pour le Prototype de T-shirt intelligent à base de PCB flexible.

Comme le volume des composants électroniques ne permet pas le déplacement de la tête d'aiguille de la machine à coudre ou de la brodeuse, il est impossible d'utiliser la technologie de couture ou de broderie pour réaliser une couverture de fil non-conducteur. La seule solution est d'utiliser le silicone. Le premier essai est réalisé dans le cadre du projet ETextWeld avec TTRI et TEIP).

Plusieurs types de silicone ont été testés, certains ne tiennent pas durant le lavage (Figure 58). La dégradation se fait au niveau de la connexion du fil métallique. Si ces fils métalliques sont remplacés par le fil conducteur textile et le PCB flexible, la silicone est un bon candidat pour la protection de PCB. Cependant, à cause de l'effet de capillarité, la structure textile peut quand même absorber de l'eau même si elle est encapsulée par la silicone. Par exemple, si une pile est encapsulée dans la silicone, elle sera abîmée après le lavage (Figure 59).

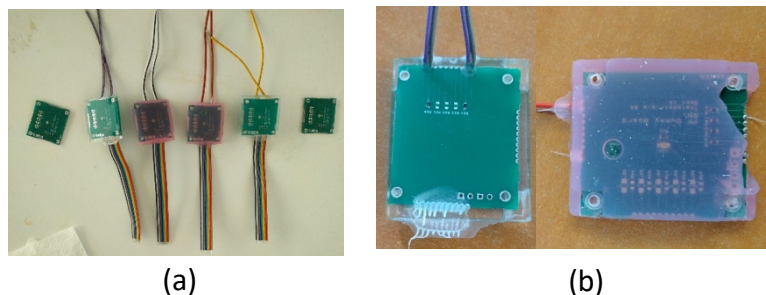


Figure 58 : Test de lavage des circuits rigides (prototype de test de TEIP) protégés par la silicone. (a) Avant lavage. (b) Prototype abîmé après lavage.

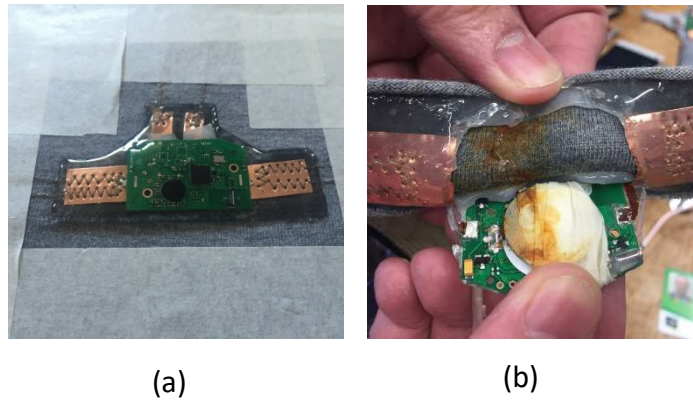


Figure 59 : Test de lavage des circuits flexibles (prototype de TTRI) protégés par la silicone. (a) Avant lavage. (b) Prototype abîmé après lavage.

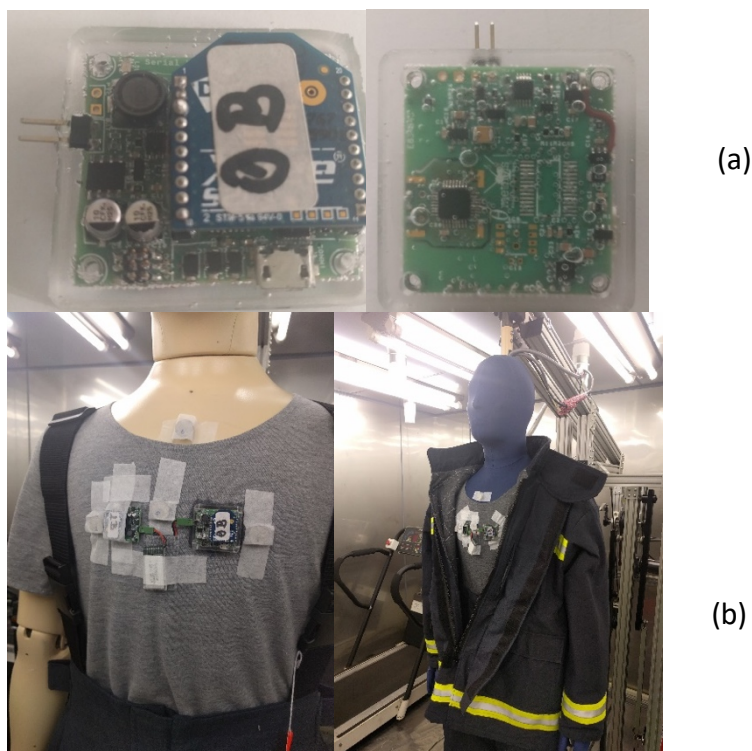


Figure 60 : (a) Prototype de TEIP protégé par la silicone. (b) Test du prototype de TEIP dans une chambre de climatisation avec un mannequin transpiratoire.

En ce qui concerne le PCB rigide, le silicone est suffisant pour une protection contre l'humidité et l'eau (sans lavage). Nous avons testé le prototype de TEIP fabriqué à base du PCB rigide avec les capteurs intégrés (Figure 60). La température dans la chambre de climatisation varie entre 35,9°C et 45°C. L'humidité atteint jusqu'à 100%. Le prototype fonctionne parfaitement et les valeurs de température et d'humidité peuvent être captées.

4 Analyse des impacts pendant le lavage

Même si nous avons réalisé plusieurs prototypes de textiles intelligents, une question reste d'actualité : « Quelle méthode doit-on utiliser pour laver le produit textile intelligent ? ». Ce doute provient du fait qu'il n'existe pas une norme pour tester la lavabilité des produits textiles intelligents, même s'il existe plusieurs normes sur les méthodes de lavage des textiles

(ISO 6330, AATCC 135, ISO 105-C06, ISO 105-10, AATCC-6-2016, etc.). Les chercheurs choisissent la méthode de lavage qu'ils souhaitent [84]–[96]. De plus, pendant le lavage, des impacts différents sont subis par les textiles intelligents. L'analyse de ces impacts générés par le lavage est effectuée dans le cadre de la thèse de doctorat de Shahood Uz ZAMAN et du projet LUMINOPTX.

Notre objectif final est de concevoir une norme de lavage pour les produits textiles intelligents. En amont, il est essentiel de comprendre le processus de lavage dans une machine à laver domestique. Généralement, un processus de lavage peut être divisé en quatre parties (trempage, lavage, rinçage et essorage). Chaque partie comprend différents impacts (Tableau 22).

Tableau 22 : Impacts dans un processus de lavage complet.

Partie \ Impact	Trempage	Lavage	Rinçage	Essorage
Eau	X	X	X	
Chimie	X	X		
Mécanique		XX	XX	X
Température		X		
X : Impact moderne XX : Impact important				

Nous avons étudié les impacts de l'eau, de l'action chimique et des mouvements mécaniques sur le fil conducteur (Shieldex 117/2 ply HCB).

4.1 Impacts de l'eau et du détergent

Pour étudier les impacts de l'eau et du détergent, nous avons choisi une lessive commerciale selon la norme ISO 6330 :2000 sans agent de blanchiment (James H.Heal, UK). Le rapport de mélange avec ce détergent est fixé à 1g/Litre. Ce détergent contient 5-15 % en masse de l'agent anionique actif, d'enzyme et de parfum. Les fils conducteurs ont été immergés dans de l'eau distillée et un mélange détergent/eau à 30 °C pendant différentes durées de temps allant de 30 minutes à 72 heures.

Sur la Figure 61, nous constatons que les pics caractéristiques du polyamide sont devenus proéminents. Auparavant, un revêtement d'argent sur la surface du fil empêchait de détecter la couche polymère intérieure via FTIR-ATR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - Attenuated total reflection). L'existence des pics de polyamide indique que la couche enduite d'argent sur le fil de polyamide est décollée. Lorsque les intensités de pointe sont comparées, il apparaît que l'eau distillée a un effet légèrement plus agressif sur les fils par rapport à l'eau avec le détergent.

Cela peut s'expliquer par le manque de surfactant dans l'eau distillée ou par la nature polaire de l'eau. L'intensité maximale est augmentée avec la durée de trempage pour les solutions aqueuses et détergentes. Au cours des 6 premières heures, l'eau n'a pas exercé d'effet agressif sur le fil, mais l'effet de l'eau devient plus destructeur avec le temps. Dans les deux cas, une augmentation du temps se traduit par une amélioration des intensités de pointe. Les intensités de pointe les plus élevées ont été enregistrées pendant les 72 heures de traitement. On peut également observer que les rapports d'absorbance sont relativement plus élevés pour les fils immergés dans l'eau distillée (Figure 62).

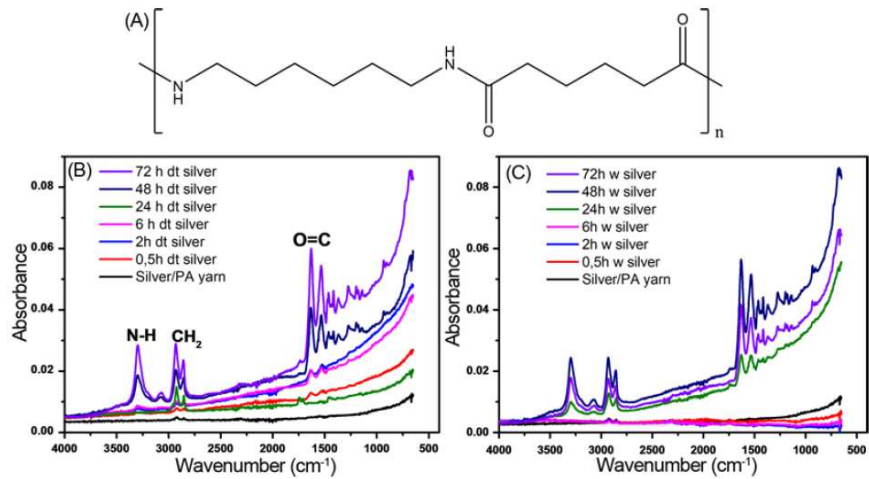


Figure 61 : (a) Structure chimique du polyamide. (b) FTIR-ATR résultats de fils conducteurs immergés dans le mélange de l'eau et du détergent. (c) FTIR-ATR résultats de fils conducteurs immergés dans le mélange de l'eau distillée.

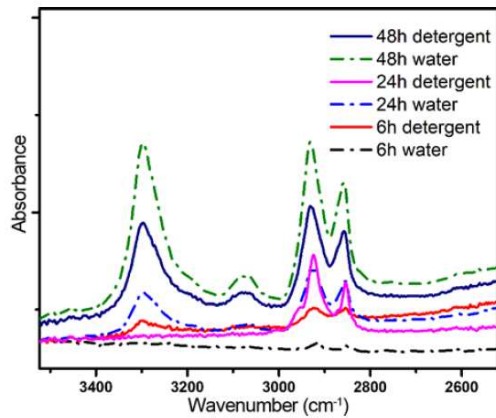


Figure 62 : Spectrum d'absorbance des échantillons.

D'après des images de MEB (Figure 63), on constate que les surfaces de fil enduites d'argent ont été endommagées. Comme un revêtement d'argent sur un fil n'a qu'une épaisseur de 1 μm , un retrait de cette couche peut être vu comme une rugosité sur les images.

La Figure 64 représente le changement de résistance des fils revêtus d'argent après le processus de mouillage. L'eau distillée a un effet plus agressif sur les échantillons par rapport à l'eau avec une solution détergente. Cela pourrait être expliqué par la nature polaire des molécules de H₂O. De plus, le détergent comprend un surfactant qui rend les interactions et la dispersion des particules plus homogènes.

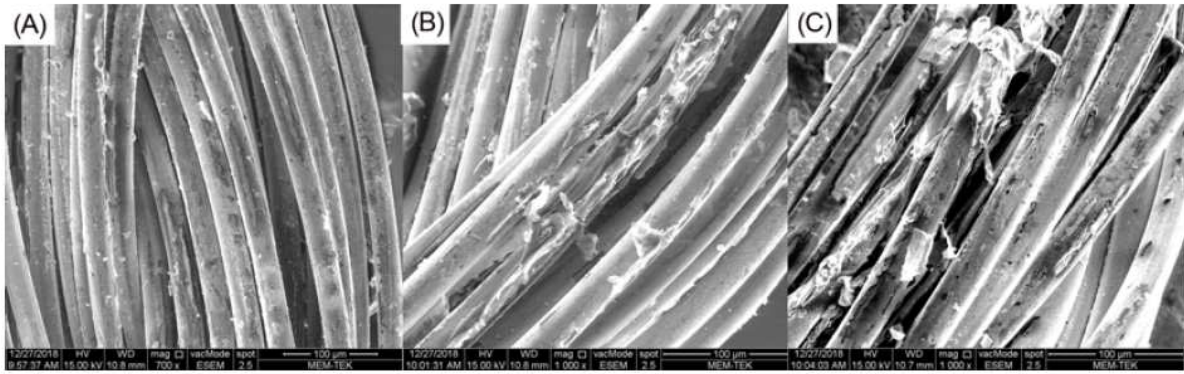


Figure 63 : Images MEB pour les fils conducteurs (a) sans immergent (b) Immergés dans l'eau avec détergent (c) Immergés dans l'eau distillé.

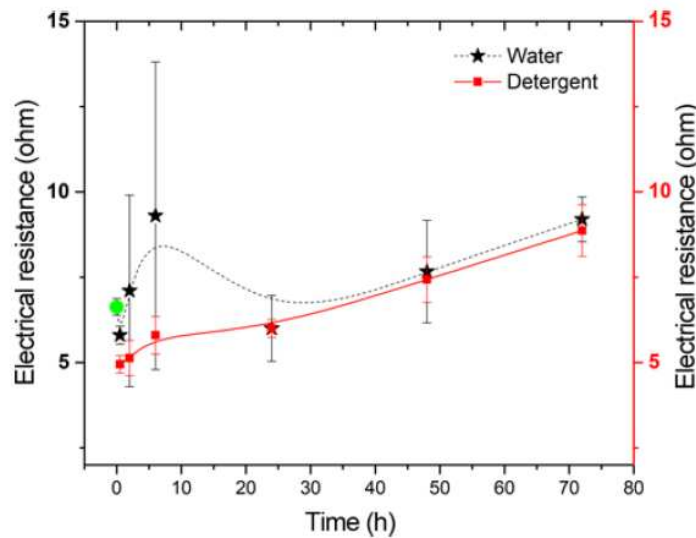


Figure 64 : Résistance électrique des fils conducteurs.

4.2 Impact des mouvements mécaniques

Pour étudier les impacts des mouvements mécaniques, nous commençons par l'analyse des comportements des mouvements du tambour de la machine à laver, puis nous analysons les comportements des mouvements de tissu pendant le lavage. La machine à laver utilisée dans nos études est une MIELE W3240.

4.2.1 Analyse des mouvements du tambour par enregistrement vidéo

Chaque machine à laver domestique nous propose plusieurs programmes de lavage (Coton, Laine, Rapide, etc.). La durée de lavage, la vitesse de lavage et la vitesse d'essorage de tambour varient selon les différents programmes. Un programme de lavage complet se compose de trois étapes (lavage, rinçage et essorage). Pour chaque étape, le tambour pourrait être dans l'un des trois états (en repos, rotation à faible vitesse, rotation à grande vitesse). La Figure 65 illustre un exemple de composition des états de tambour pour trois étapes d'un processus complet de lavage.

Pour bien calculer les durées des états du tambour, nous avons enregistré les vidéos d'un processus de lavage pour tous les programmes. La Figure 66 récapitule les durées pour les états de tambour différents dans un processus complet de lavage d'après les vidéos

enregistrées. En ce qui concerne la rotation à vitesse faible, pour les programmes « soie » et « laine », elle correspond à 15 RPM. Pour les autres programmes, elle est de 38,5 RPM. Cette vitesse est prédéfinie par le fabricant.

Parmi tous les programmes, les programmes « soie » et « rapide » sont les plus courts. Souvent on considère qu'une longue durée de lavage est plus néfaste pour les e-textiles qu'une courte durée. Cependant, à partir de nos expériences, il a été observé que les durées réelles des rotations et des arrêts devraient être considérées au lieu de la durée totale du processus de lavage.

Par exemple, une comparaison des programmes de lavage « soie » et « rapide » a montré que les deux avaient presque la même durée totale. Toutefois, la durée de l'état « en repos » varie de 33% dans le programme « rapide » à 71% dans le programme « soie ». De même, le programme « laine » avait une durée totale de lavage de 40 min, et le pourcentage de son état « en repos » était le plus important (85%) parmi tous les programmes. Le programme « délicat court » avait également une durée totale de 42 minutes, proche du programme « laine » ; le pourcentage de son état « en repos » était de 55%, soit près de 30% de moins par rapport au programme « laine ». Lorsque le tissu est en action de rotation, il est sous les contraintes de l'eau, des contraintes chimiques ou thermiques, lorsqu'il est dans l'état « repos », les contraintes mécaniques peuvent être négligées et les dommages globaux seraient réduits.

De l'analyse des vidéos, il a été conclu que la durée des états de rotation à faible vitesse et à grande vitesse devait être privilégiée sur la durée de l'ensemble du processus de lavage. Le programme « rapide » avait un état de rotation à grande vitesse de 21% et le programme « soie » n'avait qu'un état de rotation à grande vitesse de 3%, bien que leurs temps de lavage totaux étaient presque les mêmes. Le programme « coton » avait le temps de lavage total le plus long, mais son pourcentage en l'état rotation à grande vitesse était d'environ 13%, moins que le programme « rapide » ayant le temps de lavage global le plus court.

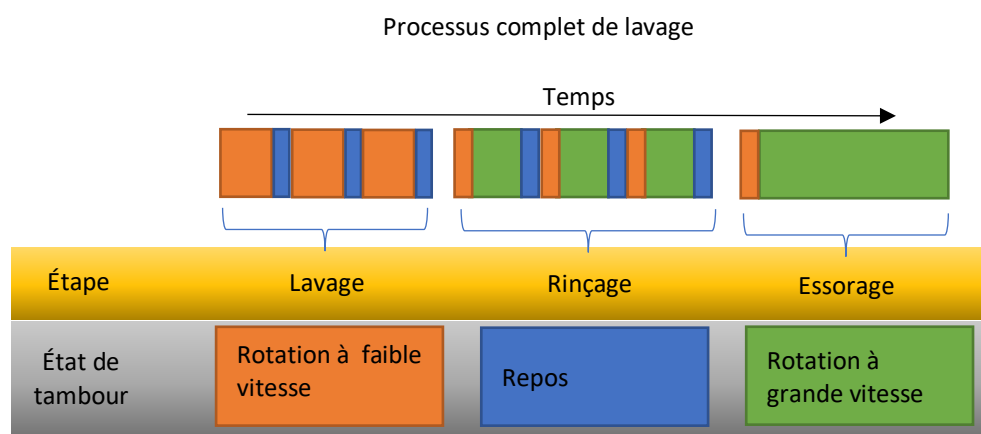


Figure 65 : Exemple des états de tambour pour un processus de lavage complet.

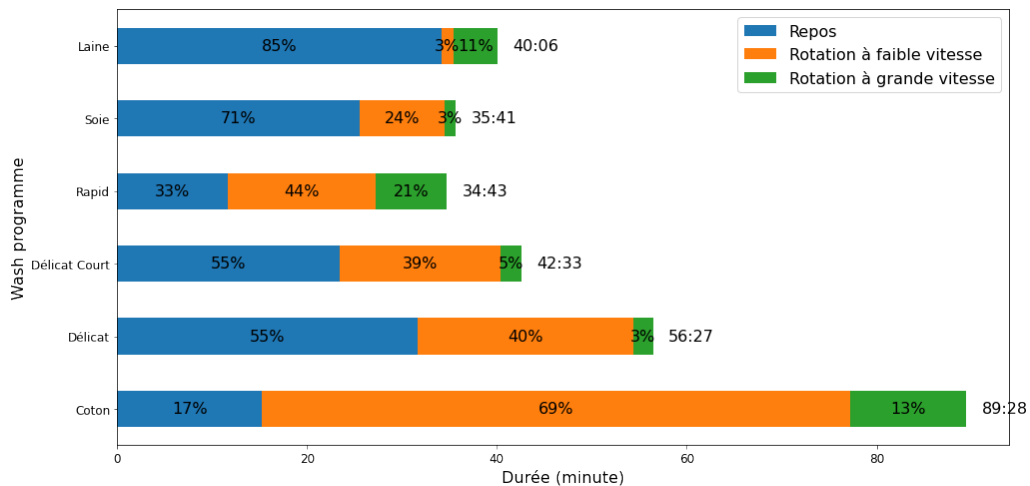


Figure 66 : Durée totale et pourcentage des durées pour chaque état de tambour dans d'un processus complet de lavage.

4.2.2 Analyse des mouvements de tissu par accéléromètre pendant le lavage

Pour étudier les actions mécaniques et les contraintes subies par les dispositifs e-textiles lors d'un processus de lavage, un PCB flexible intégré avec un accéléromètre (MPU -6050) et une unité de communication Bluetooth (RDF 77101) a été utilisé. Le circuit électronique est le même circuit que celui utilisé pour le T-shirt intelligent (Chapitre III Section 3.2.1 Page 78). Il a été cousu sur un morceau de tissu en coton. Le tissu a ensuite été scellé dans une enveloppe en plastique étanche à l'air pour éviter les dommages causés par l'eau et les produits chimiques. La plage de mesure d'accéléromètre est de ± 16 g avec une fréquence d'échantillonnage de 40 Hz (Figure 67). La vitesse de rotation à vitesse faible utilisée pour l'analyse de l'accéléromètre était de 38 RPM, et des expériences de rotation à vitesse élevée ont été effectuées à 400 et à 600 RPM.



Figure 67 : Photo du circuit électronique scellé par une enveloppe en plastique étanche.

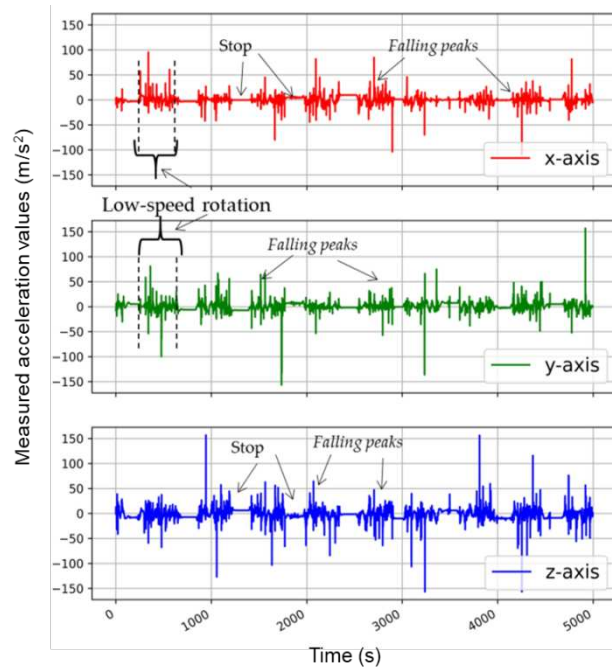


Figure 68 : Résultat de mesure d'accéléromètre pendant l'étape de lavage.

La Figure 68 montre le mouvement de l'accéléromètre pendant un cycle de lavage. Au cours de ce cycle, le tambour de lavage a tourné pendant plusieurs minutes, puis s'est arrêté à l'étape de « repos », puis a tourné de nouveau. Ce phénomène est visible sur la figure, où les états de repos et de déplacement (action de rotation à vitesse faible) peuvent être distingués. Les directions X et Y étaient sur la surface du PCB et la direction Z était perpendiculaire au PCB. Comme l'accéléromètre était fixé sur le tissu et que le tissu se déplaçait dans toutes les directions et orientations pendant le cycle de lavage, les trois axes se déplaçaient également dans toutes les directions et orientations, ce qui signifie qu'elles ne correspondaient pas au système de coordonnées de la machine à laver. Puisque la charge de lavage n'était que de 2 kg selon la norme ISO 6330, il y avait suffisamment d'espace pour que l'accéléromètre se déplace avec le processus de lavage. Il n'a pas été possible de prédire le comportement et les mouvements aléatoires des tissus pendant les cycles de lavage. Pour cette raison, un mouvement d'accéléromètre non isotrope peut être observé.

L'étape de lavage impliquait le mouvement des tissus le long de la paroi du tambour avant qu'ils ne tombent librement sous l'effet de la gravité. La Figure 68 montre les différents pics dans les trois axes pendant l'action de rotation à vitesse faible. Nous avons identifié ces pics comme des pics descendants car leurs valeurs étaient supérieures à 1 g. Ils peuvent s'expliquer par le fait que l'accéléromètre a heurté la paroi du tambour. Ce type de pic a été prouvé par une expérience à l'extérieur de la machine à laver lorsque l'accéléromètre est tombé et a heurté le sol projeté à une distance égale au diamètre du tambour (0,47 m).

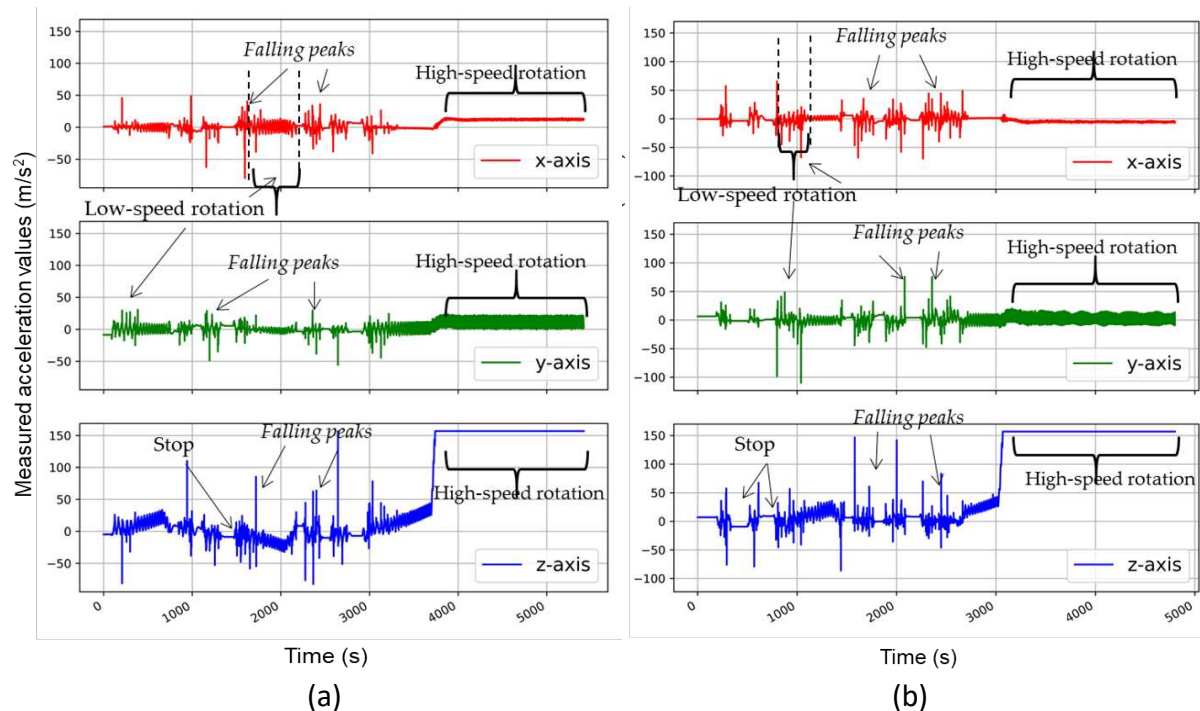


Figure 69 : Résultat de la mesure d'accéléromètre pendant l'étape d'essorage (a) 400 RPM (b) 600 RPM.

La Figure 69 montre le mouvement de l'accéléromètre pendant l'étape d'essorage à vitesse élevée. La vitesse de rotation a commencé à 0 tr / min, et elle a atteint la vitesse maximale requise en quelques secondes. Le graphique de l'accéléromètre montre la même tendance au début que le lavage à action de rotation à basse vitesse. L'accéléromètre est tombé encore et encore à cause de la gravité. Avec l'augmentation de la vitesse de culbute, l'accéléromètre s'est collé sur la paroi du tambour rotatif. Après ce moment, une ligne droite à la valeur maximale mesurable de l'accélération (16 g) dans la direction Z a été atteinte.

Selon la deuxième loi de Newton ($a = w^2 \cdot r$), pour le diamètre du tambour de 0,47 m à la vitesse de culbute de 400 RPM, la valeur d'accélération réelle était de 42 g, ce qui était supérieur à la limite supérieure de la capacité de l'accéléromètre (16 g). Par conséquent, une ligne droite à un niveau extrêmement mesurable a été observée pendant toute la durée de la rotation à vitesse élevée. Cette équation a également validé l'analyse de l'accéléromètre et sa crédibilité pour détecter les forces de lavage agissant dans le processus de lavage.

Avant les expérimentations, nous pensions que l'étape d'essorage serait la plus dommageable en termes de contraintes mécaniques agissant sur les supports textiles lavés. Cependant, à partir de l'étude de l'accélération, nous avons conclu qu'à l'exception des premières secondes, le support textile était collé à la paroi du tambour quelle que soit la vitesse. Grâce à une comparaison des étapes de lavage et d'essorage, nous avons constaté que l'action de rotation à faible vitesse provoquait un impact de mouvement intensif sur le substrat de lavage. Bien que la vitesse de rotation à faible vitesse varie entre 15 et 38 RPM maximum, les supports textiles tombent plusieurs fois en raison de la gravité, et ce mouvement peut causer des dommages physiques aux pièces sensibles du textile électronique. Cette analyse correspond aux travaux de Bao et al. [97] concernant le mouvement du support dans le processus de lavage.

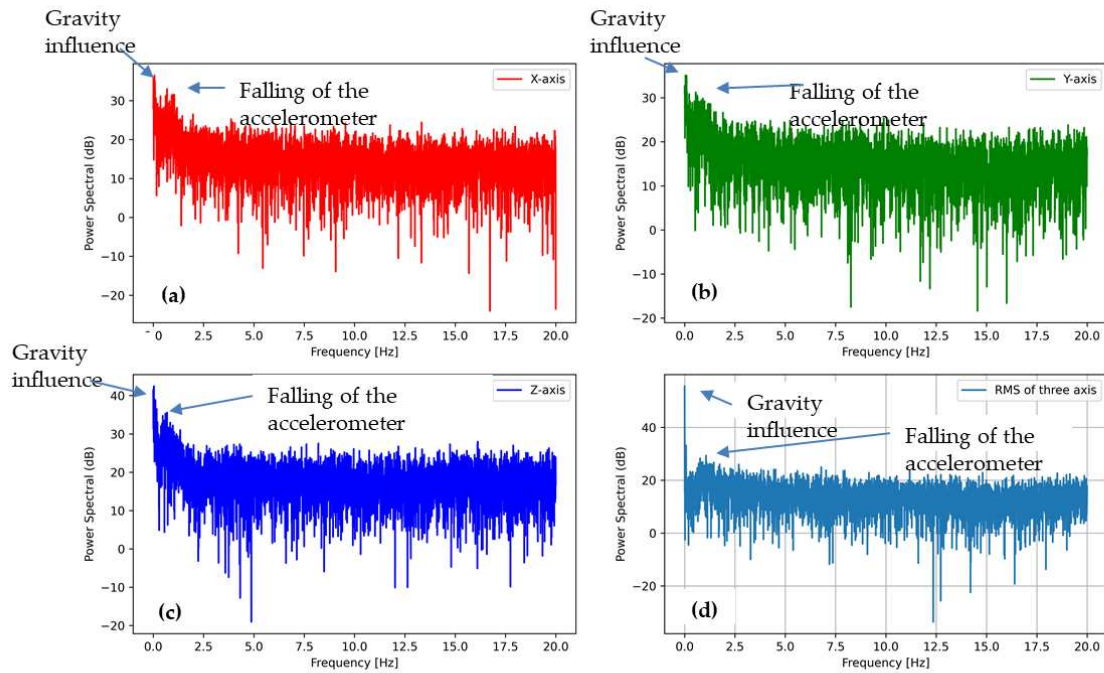


Figure 70 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant l'étape de lavage. (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.

La Figure 70 illustre l'analyse de la PSD (Densité spectrale de puissance) pendant la rotation à faible vitesse. Il est possible de remarquer que les signaux PSD sont assez « bruyants ». Mais sans tracés spécifiques, on peut conclure qu'il y avait des pics dus à la rotation à vitesse faible. Cependant, il est possible de remarquer un petit pic aux basses fréquences d'environ 1 Hz, indiquant que l'accéléromètre tombait de la position haute car le régime était faible et la force centrifuge pas assez forte pour le maintenir collé à la paroi du tambour. Pendant la longue période, les valeurs moyennes du mouvement de l'accéléromètre dans trois directions étaient probablement quasi isotropes.

Les Figure 71 et Figure 72 illustrent les analyses des PSD pendant la rotation à vitesse élevée. Elles montrent une tendance similaire, quelle que soit la vitesse d'essorage. Le pic à 0Hz de la direction Z correspond à la force centrifuge. Un autre pic est visible à environ 7 Hz pour 400 RPM et 10 Hz pour 600 RPM, indiquant les vibrations de la machine à laver pendant l'action de rotation à vitesse élevée susceptibles d'endommager une structure textile électronique.

Les Figure 73 et Figure 74 montrent l'analyse des PSD pour une rotation à vitesse élevée après avoir supprimé la phase d'accélération angulaire initiale. Sur ces figures, il est possible d'observer la force centrifuge sur l'axe Z. Le « bruit » est réduit en raison de la suppression des données pendant la phase d'accélération angulaire. Un pic à 1 Hz dû à la chute de l'accéléromètre au stade initial d'accélération angulaire a également disparu. Des vibrations prononcées à 7 et 15 Hz dans la direction X pour 400 RPM et 10 et 20 Hz pour 600 RPM sont visibles. Les mêmes types des pics peuvent être observées dans la direction de Y. Ces pics indiquent ainsi un possible frottement contre la paroi du tambour.

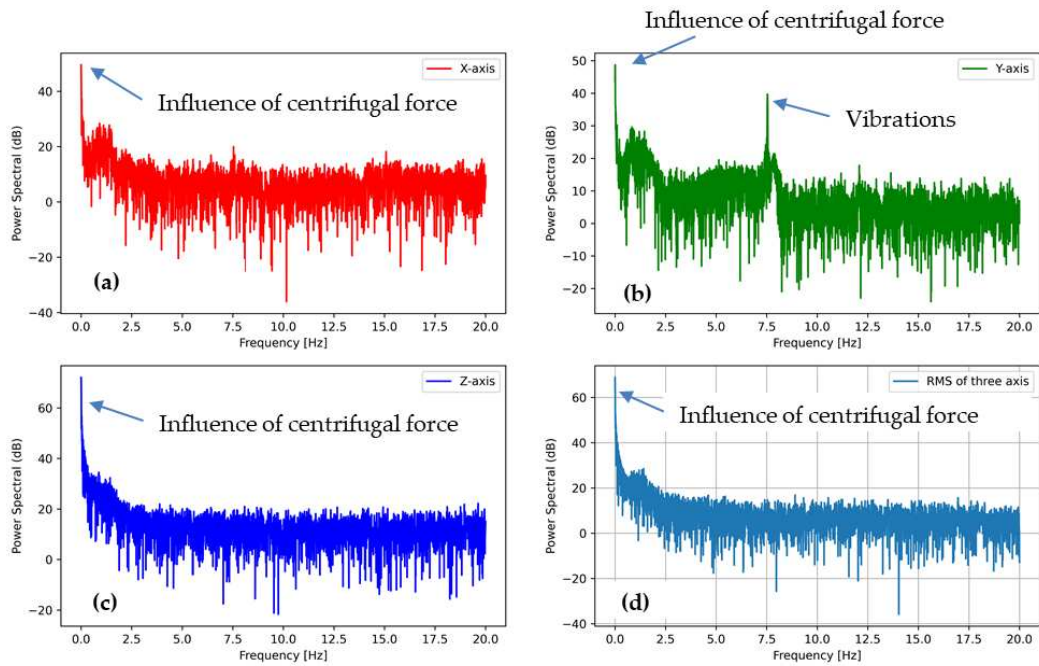


Figure 71 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant l'étape d'essorage (400 RPM) (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.

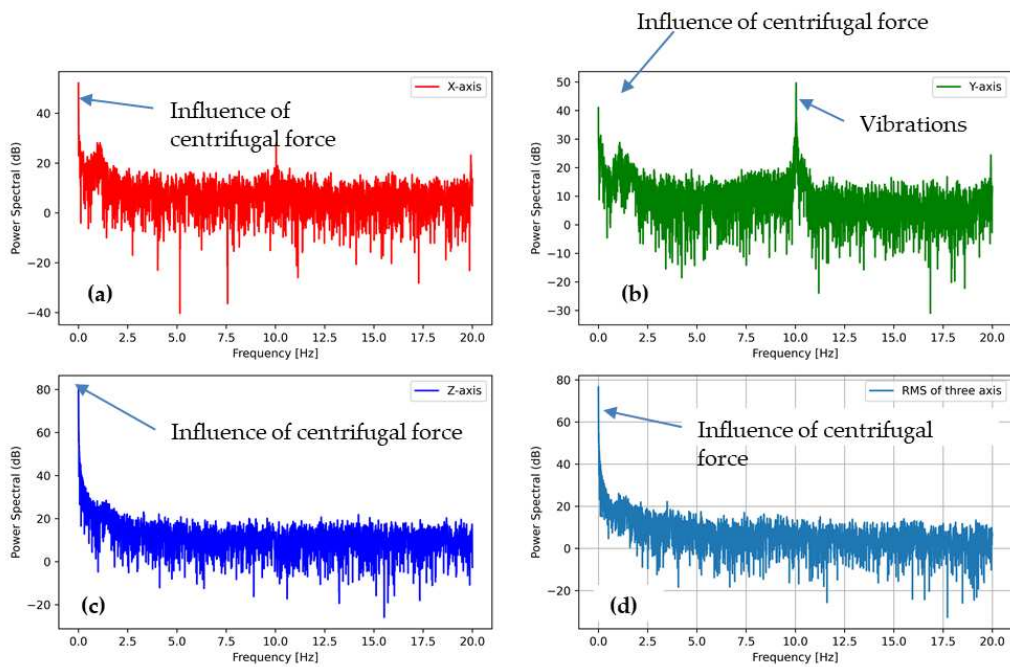


Figure 72 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant l'étape d'essorage (600 RPM) (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.

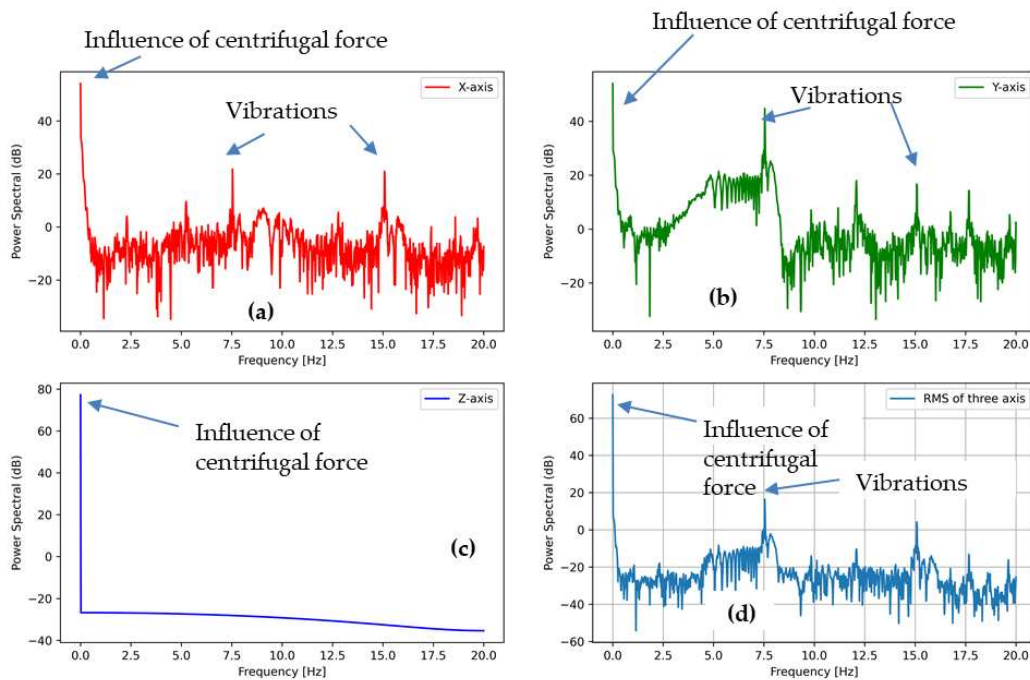


Figure 73 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant la rotation élevée (400 RPM) (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.

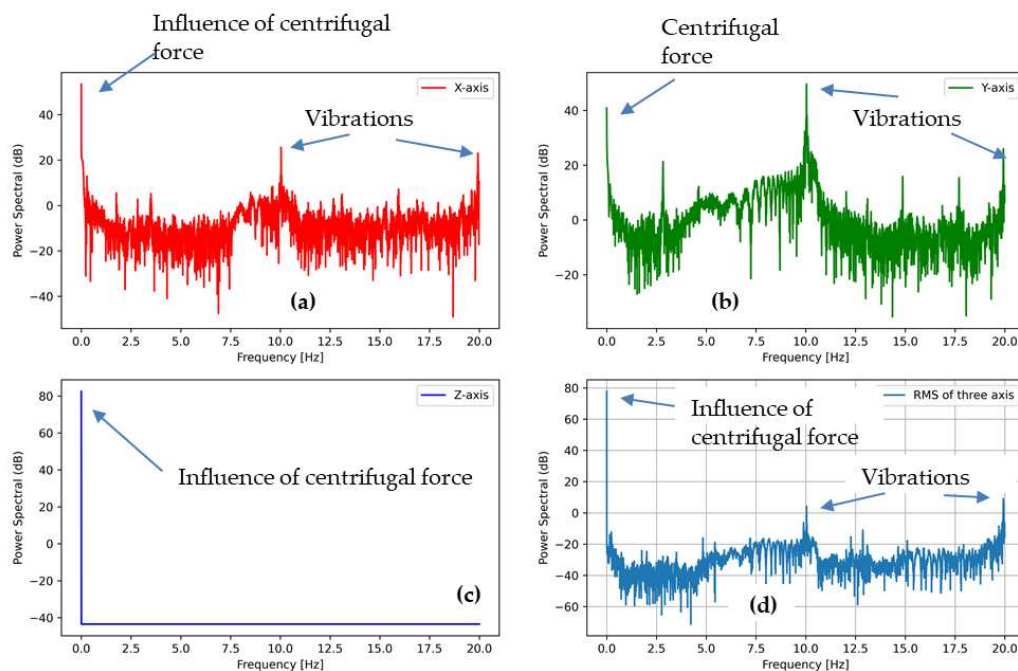


Figure 74 : PSD analyse des données d'accéléromètre pendant la rotation élevée (600 RPM) (a) X direction. (b) Y direction. (c) Z direction (d) Moyenne quadratique de toutes les directions.

Cette explication a mis en évidence deux différents types de comportement du support textile, en termes de contraintes mécaniques, pendant le processus de lavage. En rotation à faible vitesse, nous avons observé des pics basse fréquence (1Hz) dans l'analyse de la PSD. Ces mouvements pourraient être simulés en utilisant le test de la boîte de boulochage (pilling-box). Le test de la boîte de boulochage utilise une boîte fermée avec un certain nombre de

tours par minute, ce qui donne une simulation très proche du mouvement du tambour pendant les cycles de lavage. Bien que la boîte de boulochage ne soit pas aussi circulaire qu'un tambour de lavage, elle nous a permis d'obtenir la meilleure simulation possible pour une rotation à vitesse faible. De même, dans l'action de rotation à vitesse élevée, nous avons observé la force de pression dans l'axe Z et le mouvement dans les axes X et Y. On peut supposer que cette contrainte mécanique pourrait être simulée par le test d'abrasion avec la machine Martindale. Ce test est réalisé en appliquant une certaine pression connue sur un tissu dans un sens et des mouvements de glissement. Ces tests mécaniques largement disponibles peuvent donc être utilisés pour simuler et prédire des dommages similaires à ceux provoqués par un processus de lavage.

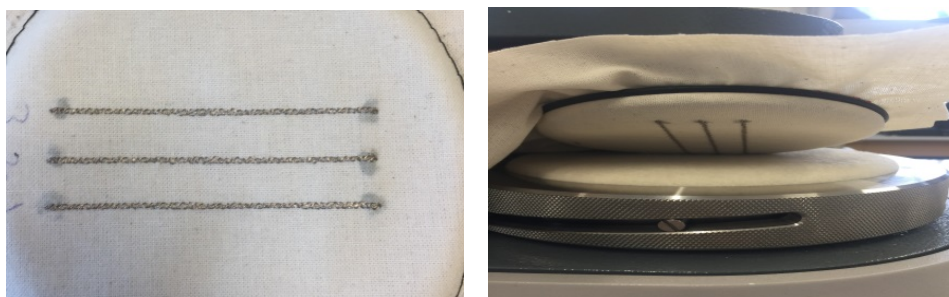
4.2.3 Simulation des impacts mécaniques par tests mécaniques

Cette section est consacrée à l'étude des tests mécaniques potentiellement utilisables pour simuler les résultats de lavage pour les fils conducteurs cousus dans une structure textile.

La résistance à l'abrasion Martindale (James H. Heals & Co Ltd) a été réalisée sous la charge de 9 K.Pa, comme défini dans le manuel du test. Un tissu en coton a été utilisé comme surface inférieure pour la résistance à l'abrasion. Le mouvement unidirectionnel de la plaque de mouvement supérieure Martindale a été sélectionné. La distance parcourue dans chaque cycle d'abrasion était de 5,5 cm et la vitesse de déplacement de l'échantillon était d'environ 0,8 s/cycle comme défini pour les mesures standardisées. Les trois types de fils (Tableau 23) ont été utilisés dans la préparation des échantillons de lavage. Le fil de type C est un multifilament avec 2 filaments en polyester et 1 filament de polyamide enduit par argent. Deux géométries de couture sont choisies : 3 zigzags (Figure 54b) et point simple avec 2,5mm de distance de point. Chaque échantillon de tissu se compose de trois lignes cousues de 7 cm de longueur avec la même géométrie et la distance entre deux lignes cousues était de 1 cm (Figure 75).

Tableau 23 : 3 types de fil conducteur choisis pour les tests mécaniques et les tests de lavage.

Type de fil	Description de fil
A	Shieldex 117/2 ply HCB
B	Madeira HC40
C	Amann silver-tech 120



(a)

(b)

Figure 75 : (a) Échantillon de test Martindale. (b) Photo de l'échantillon monté sur la machine Martindale.

D'après la Figure 76a et c, nous constatons que les changements des résistances linéiques R'/R respectent les évolutions linéaires pendant le lavage. Pour les fils A et B, leur résistance augmentent 2,13 et 2,86 après 10 cycles de lavage en programme « Soie ». La résistance du fil type C est stable le long du lavage car les deux filaments en polyester protègent le filament conducteur. Mais, sa résistance absolue est supérieure aux fils A et B. Pour le programme « Rapide », nous avons constaté la même tendance. Selon la Figure 66, la durée cumulée des états « rotation à vitesse faible » et « rotation à vitesse élevée » pour le programme « Rapide » est deux fois plus que celle du programme « Soie ». Donc, les changements des résistances des fils du programme « Rapide » sont beaucoup plus importants que ceux du programme « Soie ».

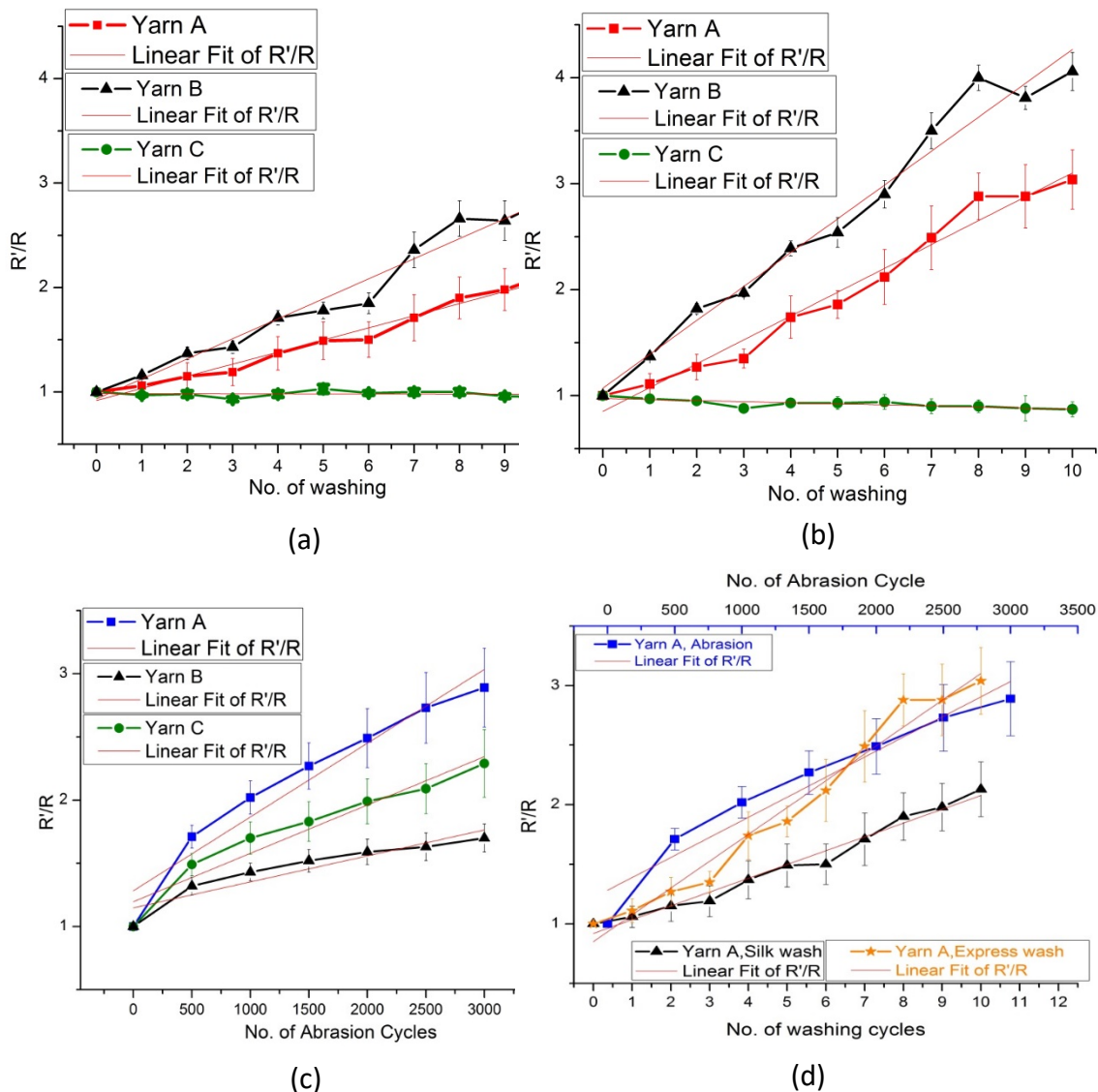


Figure 76 : Évolution des résistances des fils conducteurs sous la géométrie 3 zig-zags après le lavage et le test d'abrasion (a) Programme « soie ». (b) Programme « rapide » (c) Test d'abrasion (d) Comparaison des évolutions des résistances pour le fil A.

Les changements des résistances électriques des fils après le test d'abrasion suivent la tendance linéaire également (Figure 76c). Si nous comparons les évolutions des résistances des fils entre le test de lavage et d'abrasion, nous pouvons conclure qu'il est possible d'utiliser le test d'abrasion pour prévoir le résultat du test de lavage (Figure 76d). Par exemple, 1000

cycles d'abrasion sont équivalents aux 6 cycles de lavage avec le programme « rapide » et 10 cycles de lavage avec le programme « soie » pour le fil A.

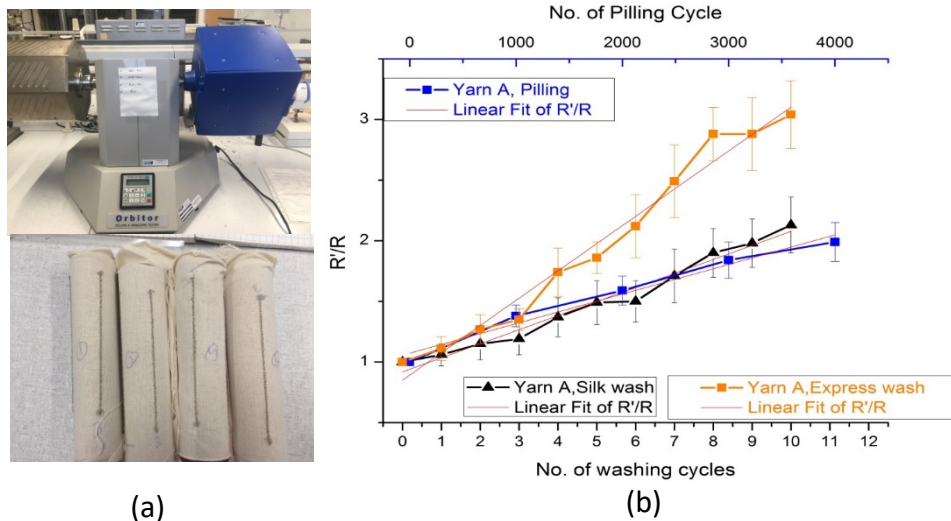


Figure 77 : (a) Photos de la machine de test de boulochage et des échantillons. (b) Comparaison des évolutions des résistances pour le fil A sous la géométrie 3 zig-zags après le lavage et le test de boulochage.

Le test de boulochage (pilling-box) reproduit le même phénomène (Figure 77). Nous pourrions dire que 4000 cycles de test de boulochage donnent le même résultat que 9 cycles de lavage avec le programme « soie » ou 5 cycles de lavage programme « rapide ».

En ce qui concerne les tests des fils avec la géométrie « couture simple », les fils de type A et B ne sont pas mesurables après 2 cycles de lavage. Donc, nous n'avons pas continué à tester cette géométrie car elle n'est pas fiable.

Tableau 24 : Équation linéaire de régression pour les tests de lavage et les tests mécaniques.

Test	Fil	Équation de régression $y : R'/R, x : \text{cycle de test}$	Valeur de R^2
Lavage « Soie »	A	$y = 0,91864 + 0,11591*x$	0,97593
	B	$y = 0,93409 + 0,19173*x$	0,96624
Lavage « Rapide »	A	$y = 0,85045 + 0,22518*x$	0,97361
	B	$y = 1,07045 + 0,31973*x$	0,97260
Test d'abrasion	A	$y = 1,28214 + 0,000584286*x$	0,92613
	B	$y = 1,14714 + 0,000205714*x$	0,84869
Test de boulage	A	$y = 1,072 + 0,000244*x$	0,96757
	B	$y = 1,104 + 0,000236*x$	0,93280

D'après le Tableau 24, nous pouvons prédire l'effet des lavages en utilisant les tests mécaniques. Ces équations peuvent être utilisées pour simuler les dégâts susceptibles d'être provoqués par les cycles de lavage. Par exemple, si nous voudrions utiliser le teste d'abrasion

pour estimer l'effet de lavage, programme « soie », l'Équation 5 nous propose la solution. Autrement dire, si nous voudrions faire 10 cycles de lavage avec le programme « Soie », nous devrions effectuer 1362 cycles de test d'abrasion pour simuler les dégâts équivalents.

$$0,91864 + 0,11591 \times x_{soie} = 1,28214 + 0,000584286 \times x_{abrasion} \text{ Équation 5}$$

Appart des effets d'abrasion et de boulochage, il existe également l'effet de pliage pendant le processus de lavage. Pour simuler cet effet, nous avons fabriqué un PCB flexible avec les LEDs soudées (Figure 78). Les largeurs des pistes conductrices sur le PCB varient de 0,15 mm à 1 mm. Les tailles des LEDs sont 0805 et 1206. Le test de pliage se fait sur la machine présentée sur la Figure 15a. L'objectif de ces tests est à étudier l'impact du mouvement de cintrage sur le design de la piste conductrice de PCB et la taille de pad de soudure de composants électronique. Ces tests sont en cours pendant la rédaction de cette mémoire et nous n'avons pas encore les résultats statistiques.

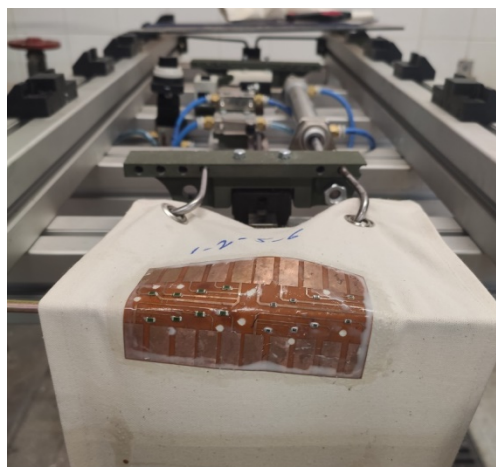


Figure 78 : Échantillons des PCBs flexibles avec les LEDs soudées.

5 Conclusion

Dans le cadre des travaux menés concernant les études de fiabilisation pour améliorer la durabilité et la lavabilité des systèmes textiles intelligents, nous avons testé les impacts du processus de lavage sur les fils conducteurs et proposé les méthodes de protection.

Dans un premier temps, nous avons testé les fils conducteurs dans une machine de lavage de laboratoire, Nous avons constaté que la résistance des fils conducteurs en polyamide enduit par argent, sans protection, augmente jusqu'à 69 fois après 50 cycles de lavage, Avec la protection TPU, la résistance augment 6 fois après 50 cycles de lavage. Pour le fil conducteur en cuivre nickelé, la résistance est stable pour les échantillons sans la protection TPU. Cependant, les multifilaments peuvent être cassés pendant le lavage. Donc, la protection de TPU est toutefois nécessaire pour éviter ce type de dégâts.

La deuxième étape de test est faite dans la machine à laver domestique. Nous avons testé plusieurs types de designs des pistes conductrices brodées. Une nouvelle méthode de protection « couverture par un fil ordinaire » a également été testée. Nous avons constaté que le design en zig-zag peut améliorer la fiabilité des pistes conductrices et la protection par fil ordinaire au-dessus peut avoir un résultat meilleur que la protection TPU.

Ensuite, nous avons testé le lavage pour le système textile intelligent. Nous avons constaté que la protection par silicone est indispensable pour le PCB mais insuffisante car l'eau peut être absorbé dans la structure textile par l'effet de capillarité.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'analyse des impacts de lavage sur le fil conducteur. Nous avons d'abord analysé les impacts de l'eau et du détergent. Ensuite, nous avons étudié les impacts mécaniques. Pour bien comprendre les mouvements de support textile pendant le processus complet de lavage, nous avons utilisé une caméra et un accéléromètre pour classifier les mouvements du tambour en trois états : repos, rotation à faible vitesse et rotation à vitesse élevée. Selon les analyses des données d'accéléromètre, nous proposons d'utiliser les tests d'abrasion (Martindale) et de boulochage (pilling-boxing) pour simuler les impacts mécaniques pendant le processus de lavage. Les modèles mathématiques linéaires sont proposés pour établir les liens entre le processus de lavage et les tests mécaniques.

Les activités sur la fiabilité, la durabilité et la lavabilité des systèmes textiles intelligents ont été valorisées par 6 publications et 3 communications en conférences scientifiques internationales.

Cinquième partie – Travaux sur la conception orientée vers les interactions homme-machine pour les plateformes numériques de co-crédation de vêtements

1 Introduction

Dans un contexte économique où les concurrences internationales sont exacerbées, la customisation, ou personnalisation de masse des produits, devient une stratégie très importante des entreprises pour améliorer la valeur perçue de leurs produits. Dans ce chapitre, nous avons développé des différents concepts orientés vers les interactions homme-machine pour établir une plateforme numérique de co-crédation de vêtements.

La première partie de ce chapitre concerne le développement d'une plateforme de « co-crédation » permettant aux commerçants, aux créateurs et aux clients d'acquérir conjointement une nouvelle expérience sur le développement de vêtements personnalisés à forte valeur ajoutée sans entraîner de surcoûts industriels. Ces travaux sont menés dans le cadre du projet Camille3DS (FUI) en collaboration avec deux groupes industriels « IDgroup » et « Damartex ». Nous avons recruté un doctorant M. CHEN Xiao pour travailler à ce projet.

La deuxième partie de ce chapitre consiste à développer deux techniques de création pour les stylistes et modélistes afin de fournir des solutions de conception et d'évaluation de vêtement basées sur la connaissance humaine.

La troisième partie de ce chapitre consiste à développer une modélisation d'évaluation du fit d'un vêtement en tenant compte de la valeur de la pression de ce vêtement générée dans le logiciel de CAO. Les entrées du modèle sont les valeurs de la pression sur différentes positions pendant l'essayage virtuel du vêtement et les sorties sont les notes d'évaluation du fit du vêtement pendant l'essayage réel.

Ces deux dernières parties de ce chapitre sont menées dans le cadre de la thèse de cotutelle de M. WANG Kaixuan en collaboration avec l'université de Donghua en Chine.

2 Développement d'une plateforme « co-crédation » en contrôlant et optimisant la perception humaine sur les vêtements virtuels.

La construction de la plateforme comporte plusieurs parties. Tout d'abord, nous avons sélectionné, par expérience sensorielle, un logiciel de CAO en confection 3D bien adapté en termes de qualité de rendu du vêtement virtuel. Ensuite, nous avons proposé un plan d'expérience sensorielle, en utilisant une nouvelle méthode d'apprentissage actif afin d'acquérir, sans mesures physiques, les paramètres techniques de l'étoffe dans un délai très court. Cette méthode est efficace, rapide, facile à réaliser et très significative notamment pour des transactions de textiles en ligne. Puis, nous avons caractérisé quantitativement la perception du vêtement virtuel par des notes numériques sur un ensemble de descripteurs sensoriels normalisés. Ces derniers concernent l'apparence et le toucher de la matière, ainsi que le fit du vêtement. Les données sensorielles ont été obtenues respectivement dans deux autres expériences sensorielles. Par apprentissage de ces données, nous avons établi deux

modèles. Le premier permet de caractériser la relation entre la perception sur l'apparence et le toucher du matériau virtuel et les paramètres techniques correspondants, constituant une entrée du logiciel de CAO en confection. Le deuxième modèle permet de caractériser la relation entre la perception du fit du vêtement virtuel et les paramètres des patrons. A l'aide des deux modèles précédents, les créateurs et consommateurs peuvent ajuster les éléments initiaux de conception pour les matières et les patrons du vêtement selon leurs attentes sur l'aspect sensoriel. La Figure 79 illustre la procédure de développement de la plateforme de co-crédation.

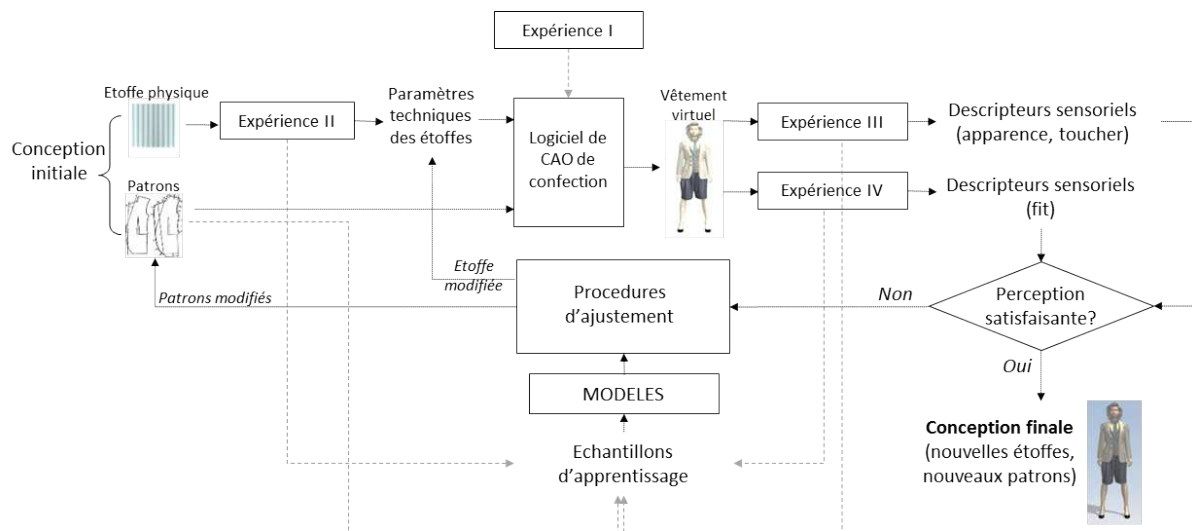


Figure 79 : Schéma général de la plateforme de co-crédation.

2.1 Crédation d'un vêtement virtuel par les logiciels de CAO

Afin de mettre en place une plateforme, nous devons tout d'abord choisir un logiciel de CAO en confection 3D pour réaliser l'essayage virtuel afin que les consommateurs puissent consulter et évaluer le vêtement. Pendant le projet « Camille3DS », il existait plusieurs logiciels de CAO en confection 3D permettant de construire un vêtement virtuel 3D à partir des patrons 2D. Ces logiciels utilisent différents modèles (géométrique, mécanique ou hybride) lors de la simulation. Étant donné que la simulation d'un vêtement en 3D dépend à la fois du modèle de simulation de tissus et de la méthode de simulation utilisée, les comportements et les rendus générés par les différents logiciels peuvent être plus ou moins différents, même si les paramètres techniques de l'étoffe saisis sont strictement identiques. Chaque éditeur de logiciel adopte, sans aucune transparence, ses propres interprétations tout autant que le choix des valeurs renseignées pour la représentation virtuelle. Dans ce contexte, il est nécessaire de retenir le meilleur logiciel pour notre étude offrant, pour une palette de vêtements variés, les rendus les plus réalistes. Pour ce faire, nous avons évalué 3 logiciels commercialisés parmi les plus connus, incluant « Modaris 3D Fit v6 » de Lectra (France), « Optitex 10 » de Optitex Ltd. (Israël) et « Clo3D 2011 » de CLO Virtual Fashion Inc. (Corée du sud). Cette évaluation correspond à l'expérience I dans la Figure 79.

Les rendus virtuels, générés par ces 3 logiciels, sont évalués au travers d'une expérience sensorielle descriptive. Concrètement, à partir de ces 3 logiciels, nous créons 3 vêtements de différents styles (une chemise de nuit V_A , une chemise à manches longues avec un caleçon long V_B et une chasuble V_C) sur 3 mannequins de morphotypes différents (M_1 , M_2 et M_3). Ces vêtements virtuels sont comparés avec les vêtements réels portés sur des mannequins

physiques reprenant les 3 morphotypes distincts. Un panel sensoriel non-entraîné, composé de 11 consommateurs, permet d'évaluer les degrés de similarité entre les vêtements virtuels et réels selon les critères préalablement définis. Les spécifications des vêtements sont récapitulées dans le Tableau 25. Le Tableau 26 montre les principales mesures morphologiques des mannequins.

Tableau 25 : Les spécifications des vêtements.

	Vêtement A (V _A)	Vêtement B (V _B)	Vêtement C (V _C)
Description du vêtement	Chemise de nuit	Chemise + Caleçon	Chasuble
Masse surfacique (g/m ²)	240,6	220,3	330,2
Épaisseur (mm)	1,1	0,9	1,6
Taille sélectionnée	S	M	43

Tableau 26 : Mesures morphologiques principales des mannequins.

	Mannequin 1 (M1)	Mannequin 2 (M2)	Mannequin 3 (M3)
Hauteur (mm)	170,5	159	166,7
Tour de poitrine (mm)	79,4	85,4	78,9
Tour de taille (mm)	62,3	68,8	62,1
Tour de bassin (mm)	89,8	93,6	87,3

Dans notre expérience sensorielle, le questionnaire sur l'évaluation des performances des 3 logiciels de CAO en confection se compose de deux parties : les variations du rendu virtuel suscitées par le changement du vêtement et par le changement du mannequin.

Pour la première partie, les 3 vêtements sont portés par le même mannequin. Les rendus virtuels statiques (scenario 1) et dynamiques (scenario 2) sont comparés avec les vêtements réels. L'enjeu est de vérifier si le logiciel est capable de simuler avec précision et qualité les effets matières et les différents styles de vêtements. Pour la deuxième partie, l'évaluation s'effectue sur le même vêtement mais avec 3 mannequins différents (scenario 3 et scenario 4). Elle a pour but de vérifier si les logiciels de CAO en confection 3D sont capables de présenter avec une bonne estimation les différents effets du fit du vêtement. Dans ce contexte, les questions posées aux évaluateurs sont plutôt orientées vers le fit de chaque partie du corps humain.

La méthodologie consiste à comparer, de manière perceptive, les photos ou les vidéos entre les vêtements virtuels et réels pour chaque logiciel selon différents critères. Une échelle de 5 niveaux de degrés de similarité est utilisée pour chaque question : 0 – identique, 1 – proche, 2 – moyennement proche, 3 – différent, 4 – très différent. Chaque participant dans ce panel effectue les évaluations devant un écran calibré de taille et résolution identiques. Les résultats de l'ANOVA à deux facteurs sur ces quatre scénarios sont indiqués dans le Tableau 27. Le seuil de signification correspondant est de 5%.

D'après les résultats de l'ensemble des scénarios, nous pouvons conclure que :

- Dans la majorité des cas, les degrés de similarité pour ces 3 logiciels varient entre 1-proche et 2 – moyennement.
- Le facteur logiciel est un facteur important qui influence sur la qualité du rendu du vêtement virtuel. En général, pour les représentations statiques, Modaris et Clo3D possèdent des performances identiques (près de 1 - proche) alors qu'Optitex est relativement faible par rapport aux deux autres logiciels (près de 2 - moyennement).

Au niveau de la représentation dynamique, Clo3D (1,21) est meilleur par rapport à Optitex (1,96).

- Ni le vêtement, ni le mannequin sont des facteurs influant sur la qualité du rendu virtuel.

Considérons que Clo3D montre la meilleure performance pour les rendus à la fois statique et dynamique, nous le retiendrons finalement pour notre étude.

Tableau 27 : Résultat de l'ANOVA pour les quatre scénarios.

Scenario 1 (statique)						
<i>facteur 1 : logiciel</i>						
	Modaris	Optitex	Clo3D	Significatif		
Moyenne	1,16	1,96	1,21	M-O	M-C	O-C
Écart type	0,76	0,6	0,6	oui	non	oui
<i>facteur 2 : vêtement</i>						
	V _A	V _B	V _C	Significatif		
Moyenne	1,39	1,43	1,51	V _A -V _B	V _A -V _C	V _B -V _C
Écart type	0,65	0,63	0,71	non	non	non
Scenario 2 (dynamique)						
<i>facteur 1 : logiciel</i>						
	Modaris	Optitex	Clo3D	Significatif		
Moyenne	-	1,96	1,21	M-O	M-C	O-C
Écart type	-	0,63	0,6	-	-	oui
<i>facteur 2 : vêtement</i>						
	V _A	V _B	V _C	Significatif		
Moyenne	1,54	1,62	1,59	V _A -V _B	V _A -V _C	V _B -V _C
Écart type	0,59	0,64	0,62	non	non	non
Scenario 3 (statique)						
<i>facteur 1 : logiciel</i>						
	Modaris	Optitex	Clo3D	Significatif		
Moyenne	0,9	1,77	1,22	M-O	M-C	O-C
Écart type	0,62	0,81	0,7	oui	oui	oui
<i>facteur 2 : mannequin</i>						
	M ₁	M ₂	M ₃	Significatif		
Moyenne	1,34	1,32	1,23	M ₁ -M ₂	M ₁ -M ₃	M ₂ -M ₃
Écart type	0,67	0,69	0,75	non	non	non
Scenario 4 (statique)						
<i>facteur 1 : logiciel</i>						
	Modaris	Optitex	Clo3D	Significatif		
Moyenne	1,24	1,67	1,17	M-O	M-C	O-C
Écart type	0,65	0,8	0,67	oui	non	oui
<i>facteur 2 : mannequin</i>						
	M ₁	M ₂	M ₃	Significatif		
Moyenne	1,41	1,36	1,31	M ₁ -M ₂	M ₁ -M ₃	M ₂ -M ₃
Écart type	0,64	0,66	0,57	non	non	non

Après avoir choisi le logiciel de CAO, nous l'avons utilisé pour tester sur les différents produits commerciaux de nos partenaires industriels (Figure 80). Dans la pratique, l'avantage le plus important du prototypage virtuel est la réduction du nombre de prototypages réels car une fois les représentations 3D numériques obtenues, il devient relativement simple d'apporter

des modifications techniques directement sur les prototypes et avec des résultats quasi instantanés pour une réactivité maximale.



Figure 80 : Comparaison entre les prototypes réels (gauche) et virtuels (droite).

2.2 Acquisition des paramètres techniques des étoffes dans le logiciel de CAO par des tests sensoriels

Tableau 28 : Caractéristiques des 19 échantillons.

Réf. d'échantillon	Composition des matières	Masse surfacique(g/m ²)	Épaisseur (mm)
T1	100% coton	92,9	0,1
T2	97% coton + 3% Lyca	133	0,2
T3	49% coton + 51% Lin	188,8	0,3
T4	100% coton	260	0,7
T5	100% coton	99,9	0,2
T6	100% coton	288,3	0,7
T7	100% coton	52,4	0,1
T8	100% coton	281,1	1,2
T9	100% polyester	10,22	0,1
T10	100% coton	120,2	0,3
T11	98% coton + 2% élasthanne	297,3	1,1
T12	100% coton	154,1	0,3
T13	100% coton	415,6	0,9
T14	55% coton + 45% lin	213	0,3
T15	50% polyester + 50% polyacrylique	120,1	0,2
T16	100% polyester	110,6	0,1
T17	100% polyester	228,1	0,4
T18	100% soie	71,8	0,1
T19	98% polyester + 2% lycra	177,5	1

Dans le logiciel de CAO en confection 3D sélectionné, les paramètres techniques des étoffes sont considérés comme des entrées du système de simulation. Le logiciel nécessite 9 paramètres mécaniques à saisir pour chaque étoffe. Lors de la simulation du vêtement, les différentes combinaisons de valeurs de ces paramètres sont nombreuses et génèrent en général des comportements statiques et dynamiques différents de l'étoffe virtuelle. Il nous est alors impossible de connaître les liens entre ces paramètres et d'exploiter ces données car le logiciel est un système fermé/privé ne laissant aucun accès aux utilisateurs. Pour identifier les valeurs les mieux adaptées des paramètres mécaniques de l'étoffe permettant de minimiser la différence perceptive de l'échantillon virtuel par rapport au réel, nous avons effectué une expérience sensorielle en comparant 19 échantillons réels et virtuels par un panel sensoriel (Tableau 28). Durant chaque évaluation, les évaluateurs du panel sont

sollicités pour estimer un degré de similarité à chaque comparaison entre les échantillons réels et virtuels, et ce au moyen d'un drapéomètre (Figure 81). Cette expérience correspond à l'expérience II dans la Figure 79.

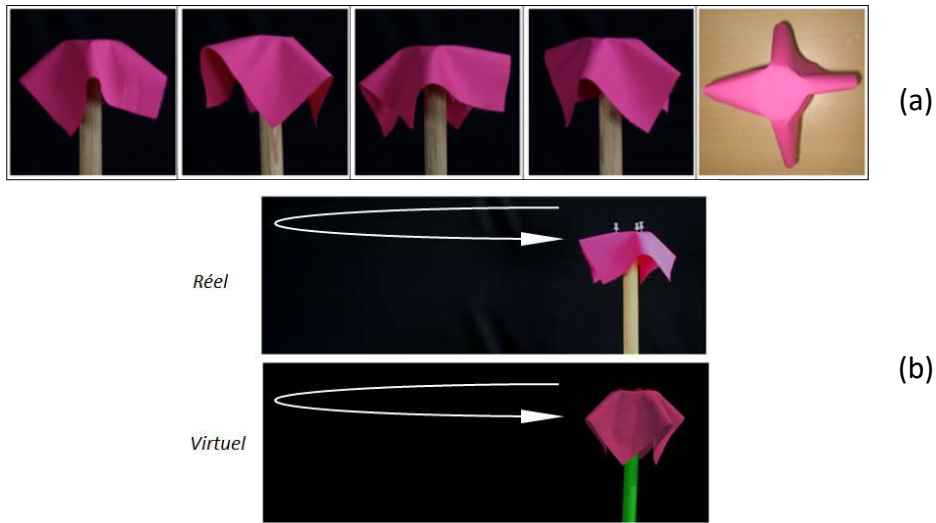


Figure 81 : (a) Différentes vues de l'étoffe réel sur le drapéomètre en scénario statique. (b) Déplacement du drapéomètre en scénario dynamique.

Dans la pratique, cette procédure doit se réaliser avec un nombre minimal d'essais. Nous utilisons tout d'abord 2 méthodes classiques de plan d'expériences : le plan d'expériences orthogonal et le plan d'expérience uniforme. Ensuite, seront proposées deux méthodes utilisant l'apprentissage actif en ligne avec l'aide d'un automate d'apprentissage et une méthode développée en propre et que nous nommerons « l'Apprentissage Actif par Suivi des Critères de Sensibilité » (AASCS) (Figure 82) qui amélioreront davantage les résultats des plans d'expériences classiques. Cette procédure se répète jusqu'à la satisfaction de l'une des conditions d'arrêt suivantes : 1) tous les paramètres deviennent infaisables ; 2) le nombre d'essais est supérieur au seuil prédéfini.

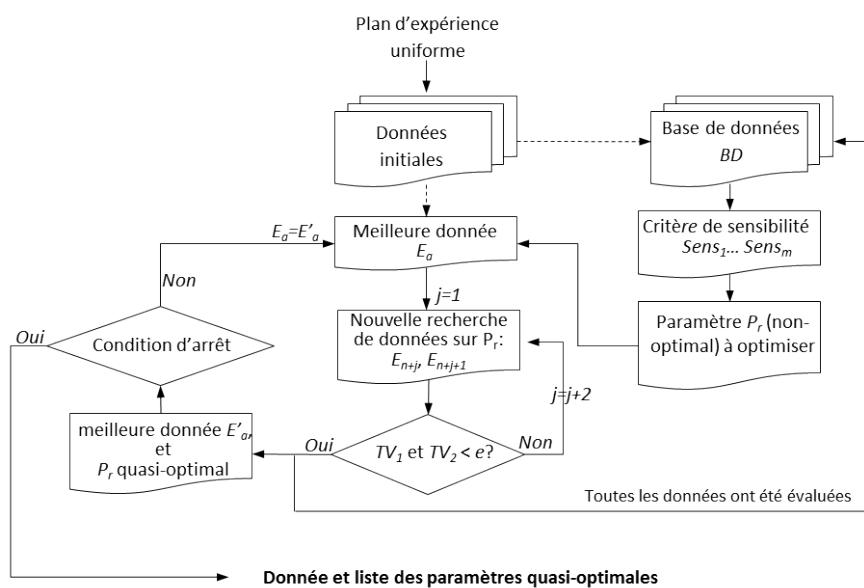


Figure 82 : Processus de la méthode proposée utilisant l'AASCS.

Dans le processus d'AASCS, E_a représente la meilleure combinaison des valeurs des paramètres mécaniques dans la recherche initiale utilisant le plan uniforme. P_r représente l'axe du paramètre r dans le plan uniforme. $Sens_m$ représente le critère de sensibilité [98]. TV correspond au taux de variation des nouvelles données par rapport à la donnée précédente (Équation 6 et Équation 7). e est un seuil prédéfini.

$$TV_1 = (GS_a - GS_{n+1})/GS_a \quad \text{Équation 6}$$

$$TV_2 = (GS_a - GS_{n+2})/GS_a \quad \text{Équation 7}$$

où GS est calculé à partir des données de similarité statique SS et dynamique DS selon l'Équation 8. La valeur de similarité varie de 0 (identique) à 4 (très différent) sur une échelle à 5 niveaux.

$$GS_i = w \cdot SS_i + (1 - w) \cdot DS_i \quad \text{Équation 8}$$

2.3 Modélisation de la relation entre les paramètres techniques du textile et la perception virtuelle du matériau

Le succès pour une création et une visualisation du vêtement virtuel réussi est lié à la fidélité de la représentation virtuelle par rapport au produit physique. Néanmoins, il existe encore un écart perceptif entre le virtuel et le réel. Il n'existe pas d'outil accessible direct, dans un environnement virtuel, permettant de modifier les représentations virtuelles pour répondre à une perception humaine désirée. Pour pallier à ce problème, nous avons créé un modèle pour caractériser quantitativement la relation entre les paramètres techniques et la perception humaine des vêtements virtuels. Ce modèle peut être considéré comme un « traducteur » entre la perception humaine d'un vêtement virtuel et ses paramètres techniques associés. Ces travaux de modélisation commencent par la génération de descripteurs sensoriels normalisés qui correspondent à l'expériment III dans la Figure 79.

Neuf descripteurs sensoriels sont générés par la méthode de « séance de créativité » et les travaux précédents [99][100] (Tableau 29). Pour chaque descripteur, nous avons défini une échelle de 11 niveaux de 0 à 10 (Tableau 30).

Tableau 29 : Définitions des neuf descripteurs sensoriels pour une étoffe.

Réf. Descripteur	Définition des descripteurs
	Pliable – Rigide
D ₁	Un textile « rigide » n'est pas facilement pliable. Il est dur et inflexible. Un textile « pliable » est au contraire souple et facile à plier et s'oppose à la sensation de « rigidité ».
	Doux-Rêche
D ₂	Un textile qui est « doux » en surface provoque un ressenti très lisse, fin et agréable au niveau de toucher. « Rêche » s'oppose à la sensation de « douceur », caractérisant la présence de particules dures et/ou d'aspérités en surface.
	Tombant-Non tombant
D ₃	Caractérise un textile capable d'épouser la forme de la main. Par exemple, l'échantillon est tenu entre le pouce et l'index de sorte qu'il se "drape" autour des doigts en direction du sol. Plus il suit la ligne des articulations, plus il est « tombant ».
	Lisse – Rugueux
D ₄	Il s'agit ici d'un jugement global de la surface. « Rugueux » caractérise une étoffe avec des aspérités ou des reliefs en surface qui s'accrochent lors d'un contact tangentiel avec la pulpe des doigts. Un textile présentant une surface lisse s'éloigne d'un textile plutôt rugueux (i.e. bosses, arêtes saillantes ou irrégularités) quand il est caressé par la main.
	Mince- Epais
D ₅	Un textile est dit « mince » lorsqu'il présente une faible épaisseur physique. «Epais» s'oppose à «mince».
	Léger – Lourd
D ₆	Un textile est « léger » lorsqu'il accuse une faible masse surfacique. Dans le cas contraire, il sera qualifié de « Lourd ».
	Chaud – Frais
D ₇	Caractérise la sensation thermique perçue au contact de la main. Un textile est « chaud » en surface lorsqu'il propose une sensation confortable et agréable au niveau de la conduction thermique à son contact.
	Brillant – Mat
D ₈	Caractérise la capacité d'une étoffe à réfléchir la lumière. Un textile brillant a une perception visuelle éclatante avec une forte réflexion spéculaire. Le terme « Mat » s'oppose à « brillant »
	Transparent – non transparent
D ₉	Capacité pour la lumière de traverser l'étoffe. Un textile transparent est capable de transmettre la lumière et les objets placés derrière l'étoffe deviennent visibles.

Tableau 30 : Échelle d'évaluation et descriptions sémantiques.

Niveau	0	1	2	3	4
Description	Extrêmement	Très	Vraiment	Assez	Plus que moyennement
	5	6	7	8	9
Moyennement	Plus que moyennement	Assez	Vraiment	Très	Extrêmement

La relation entre les paramètres techniques des étoffes (entrées du modèle) et les descripteurs sensoriels (sorties du modèle) peut être considérée comme un système complexe (Figure 83). Les entrées du modèle sont représentées par une matrice normalisée $Eval_p$ selon l'Équation 9.

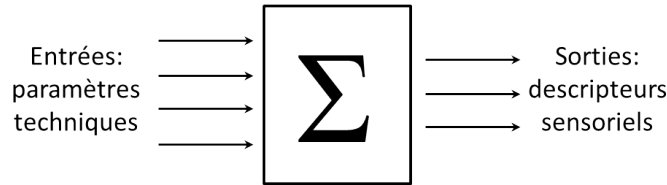


Figure 83 : Relation complexe entre les paramètres techniques et les descripteurs sensoriels.

$$Eval_p = [p_i(T_j)]_{m \times n} \quad \text{Équation 9}$$

où $p_i(T_j)$ est caractérisé par les données d'apprentissage sur les échantillons de T_j . m représente le nombre de paramètres, n représente le nombre d'étoffes.

Les sorties du modèle sont les valeurs des notes d'évaluation du descripteur $Eval_{D_k}$ selon l'expérience sensorielle (Équation 10).

$$Eval_{D_k} = \begin{bmatrix} d_k(T_1) \\ \vdots \\ d_k(T_i) \\ \vdots \\ d_k(T_n) \end{bmatrix} \quad \text{Équation 10}$$

où T_i correspond à l'étoffe i , d_k correspond à la valeur moyenne de la note d'évaluation par tous les panélistes.

Dans ces études, trois techniques de modélisation sont mises en place. Elles comprennent la régression linéaire, le réseau de neurones artificiels et l'arbre de décision floue avec l'algorithme ID3. Compte-tenu du fait que la quantité de données acquises est très limitée, nous utilisons la méthode « Leave-One-Out » pour quantifier la performance du modèle proposé. La performance du modèle est calculée par l'Écart Quadratique Moyen (EQM) qui correspond à l'écart entre la sortie réelle (résultat de l'évaluation sensorielle) et la sortie prévue par le modèle.

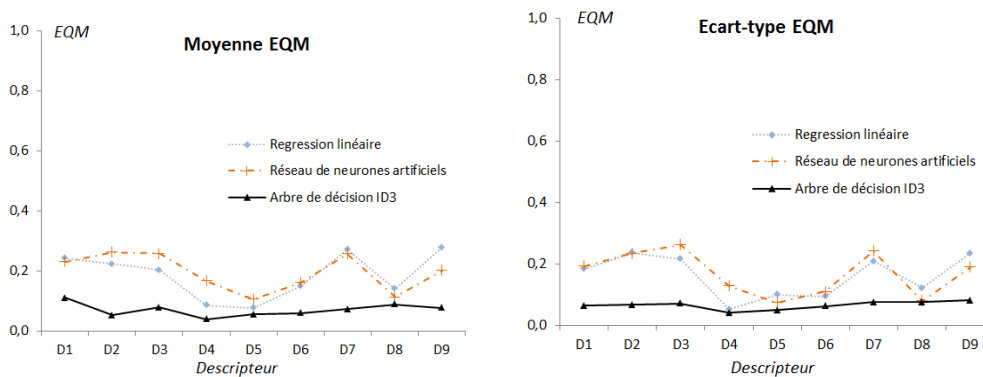


Figure 84 : Comparaison des performances globales des 3 modèles.

Parmi ces trois modèles, l'arbre de décision flou ID3 montre une meilleure performance de prédiction (Figure 84). La valeur moyenne globale de l'EQM pour tous les tests (tous les échantillons et tous les descripteurs sensoriels) est de 0,07, tandis que l'on atteint 0,19 et 0,20 respectivement pour la régression linéaire et le réseau de neurones artificiels. De plus, l'écart type global de l'EQM est également de 0,07 pour l'arbre de décision flou ID3 tandis que 0,16 et 0,17 sont respectivement atteints pour les deux premiers modèles. Concrètement, dans la plupart des tests de performance, les valeurs de l'EQM sont inférieures à 0,2, ce qui signifie que la sortie estimée par l'arbre de décision flou ID3 est assez proche de la valeur réelle du descripteur sensoriel.

A l'aide du modèle proposé, les créateurs et les consommateurs seront capables de contrôler et d'augmenter les critères sensoriels tels que la douceur, la souplesse et les effets du tomber du vêtement virtuel selon leurs préférences sensorielles ou leurs attentes. Cette approche est particulièrement intéressante pour la création de nouveaux produits personnalisés. Par exemple, la Figure 85 présente une application de la méthode de l'arbre de décision ID3 pour modifier la perception du produit afin d'obtenir des effets spécifiques personnalisés. Le vêtement réel de la collection de costumes de « cérémonie » est fourni par une entreprise industrielle. Son prototype virtuel est réalisé dans le logiciel de CAO en confection 3D par intégration des paramètres techniques. Le processus de co-création appliqué est suffisamment performant pour que la perception globale du vêtement virtuel corresponde de très près à celle du produit physique.

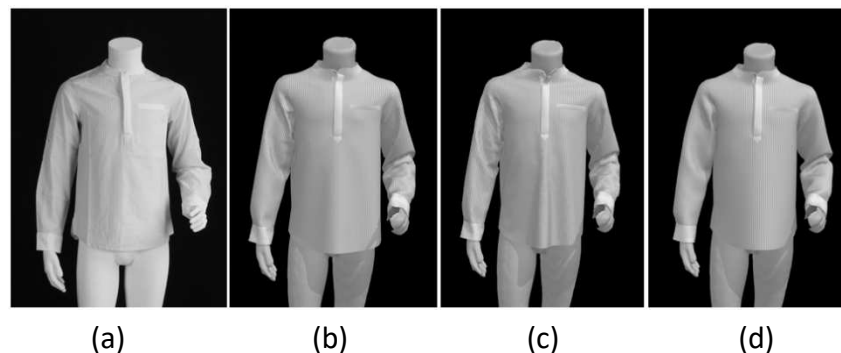
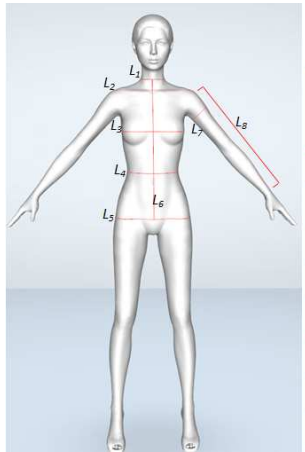


Figure 85 : Exemple de co-création pour un vêtement de la collection de costumes de « cérémonie » : a) vêtement réel ; b) prototype virtuel ; c) vêtement plus pliable ; d) vêtement plus rigide.

2.4 Modélisation de la relation entre les paramètres des patrons et la perception du fit d'un vêtement virtuel

Le dernier travail dans le cadre de cette étude consiste à établir un modèle pour évaluer le fit d'un vêtement virtuel. Dans ce contexte, nous avons créé un modèle quantitatif caractérisant la relation entre les paramètres des patrons et la perception du fit d'un vêtement virtuel. Un mannequin féminin standard est utilisé comme support des vêtements virtuels (Figure 86) et huit tailles différentes du T-shirt sont choisies pour l'essayage virtuel (Figure 87). Nous prenons 9 descripteurs sensoriels pour évaluer le fit des T-shirts par rapport aux différentes positions du corps humain, dans les scénarios statiques et dynamiques (Tableau 31). Parallèlement, une échelle de 9 niveaux, variant de -4 à 4, est utilisée pour chaque descripteur sensoriel (Tableau 32).



Réf	Description	Mesure (mm)
mm ₁	Tour de cou	331,7
mm ₂	Tour d'épaule	771,4
mm ₃	Tour de poitrine	851,5
mm ₄	Tour de taille	637,5
mm ₅	Tour de bassin	887,0
mm ₆	Hauteur de torse	589,9
mm ₇	Tour du biceps	273,8
mm ₈	Longueur de bras	575,6

Figure 86 : Mensurations anthropométriques du mannequin.

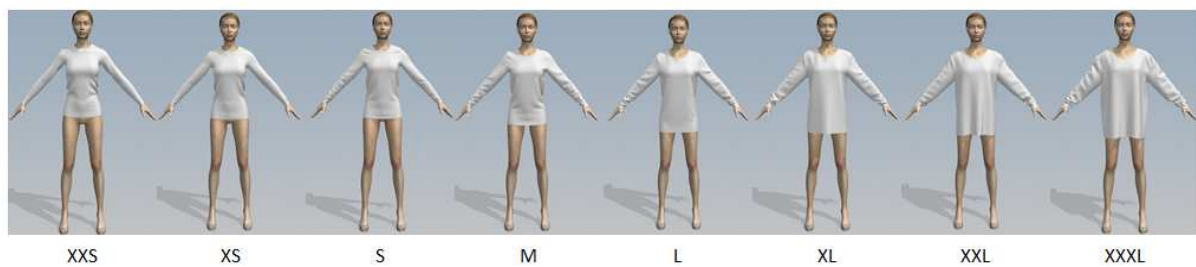


Figure 87 : Huit tailles différentes de T-shirt pour un même mannequin.

Tableau 31 : Descripteurs sensoriels du fit et les mensurations du vêtement.

Descripteur sensoriel (sortie)	Mensurations du vêtement 3D sélectionnées (entrées)
D_1 largeur d'encolure	dm_1 (tour de cou)
D_2 largeur d'épaule	dm_2 (tour d'épaule)
D_3 contact au niveau de poitrine	dm_3 (tour de poitrine)
D_4 contact au niveau de taille	dm_4 (tour de taille)
D_5 longueur de vêtement	dm_6 (hauteur de torse)
D_6 longueur de manche	dm_2 (tour d'épaule), dm_8 (longueur de bras)
D_7 restriction de mouvements de bras	dm_2 (tour d'épaule), dm_7 (tour du biceps), dm_8 (longueur de bras),
D_8 restriction de mouvements de torse	dm_2 (tour d'épaule), dm_3 (tour de poitrine), dm_4 (tour de taille)
D_9 fit global	dm_1 (tour de cou), dm_2 (tour d'épaule), dm_3 (tour de poitrine), dm_4 (tour de taille), dm_5 (tour de bassin), dm_6 (hauteur de torse), dm_7 (tour du biceps), dm_8 (longueur de bras)

Tableau 32 : Échelle d'évaluation et ses descriptions sémantiquement.

Niveau	-4	-3	-2	-1
Description	Extrêmement serré	Très serré	Assez serré	Un peu serré
0	1	2	3	4
Parfait	Un peu ample	Assez ample	Très ample	Extrêmement ample

Le fit d'un vêtement peut s'exprimer par l'écart entre le corps et le vêtement 3D. Cet écart peut être calculé à partir des mesures des patrons du vêtement et des mensurations du

porteur. Ainsi, la relation entre les paramètres des patrons et les descripteurs sensoriels du fit peut se transformer en une relation entre les écarts du vêtement 3D par rapport au corps humain, soit $\{dm_1, \dots, dm_s\}$ (les entrées), et ces descripteurs sensoriels D_1, \dots, D_p (les sorties) (Tableau 32). Nous constatons que les relations linéaires sont identifiées entre les points caractéristiques pour différentes tailles. Donc, nous formulons l'hypothèse que la relation entre les entrées et la sortie pour chaque descripteur (D_1 - D_5) est également linéaire. Cette hypothèse est avouée par un coefficient de détermination $R^2 > 0,95$ (Figure 88). En ce qui concerne les descripteurs D_6 - D_8 , comme ils sont tous liés à plusieurs mensurations, nous utilisons d'abord la régression linéaire multiple pour la modélisation. Ensuite, nous effectuons le test de nullité sur chaque coefficient obtenu avec un seuil de signification de 5%. Si le coefficient n'est pas significatif, nous supprimons le paramètre concerné et reconduisons une nouvelle fois la régression avec les paramètres restants. Les résultats des modèles obtenus sont indiqués dans la Figure 89.

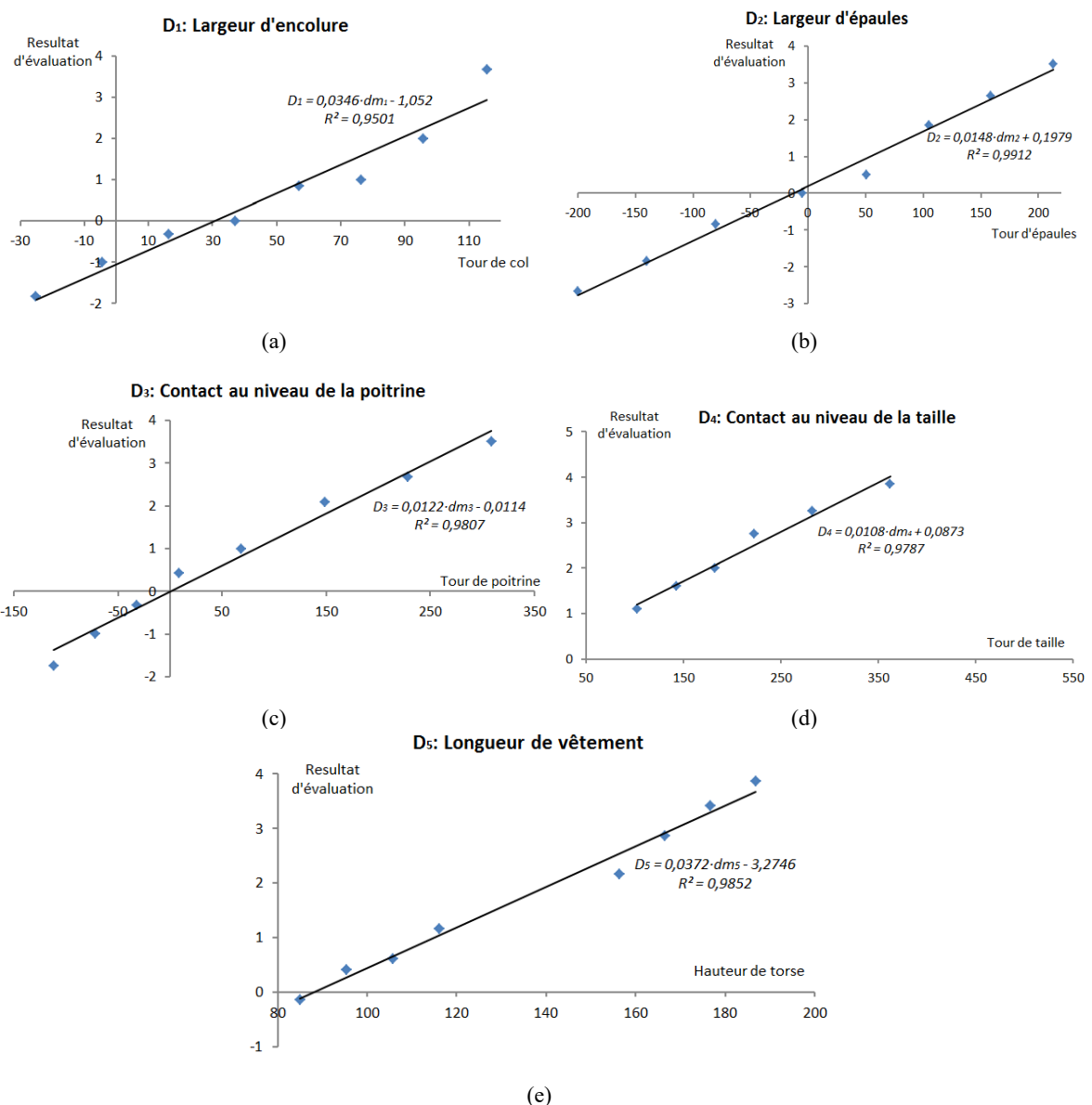


Figure 88 : Résultats des modèles linéaires obtenus : (a) D1 largeur d'encolure, (b) D2 largeur d'épaule, (c) D3 contact au niveau de la poitrine, (d) D4 contact au niveau de la taille, (e) D5 longueur du vêtement.

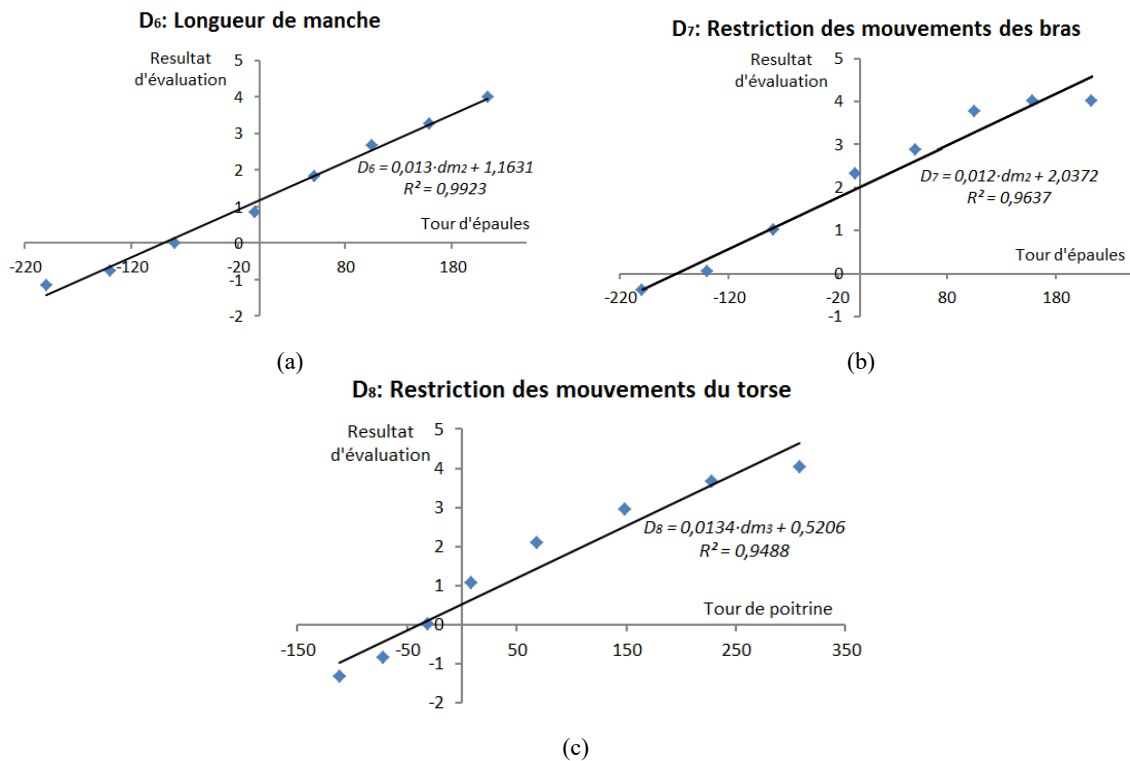


Figure 89 : Performance des modèles de régression linéaire pour les descripteurs D6, D7 et D8 : (a) D7 longueur de manche, (b) D8 restriction de mouvements de bras, (c) D9 Restriction de mouvements du torse.

Dans la modélisation du descripteur D_9 , la régression linéaire ne peut pas être appliquée directement car le nombre de données est trop faible par rapport au nombre de variables (entrées). Dans ce contexte, l'ACP (Analyse en Composantes Principales) est d'abord utilisée afin de réduire le nombre de dimensions pour les entrées. Le résultat montre que la première composante principale porte 98,8% de l'information originale. Ainsi, la modélisation par régression linéaire peut se réaliser uniquement par rapport à la première composante principale, notée cp . Nous avons :

$$cp = \begin{bmatrix} (dm_1 - 49,09) * 0,02 \\ (dm_2 - 13,07) * 0,01 \\ (dm_3 - 68,5) * 0,01 \\ (dm_4 - 282,5) * 0,01 \\ (dm_5 - 33) * 0,01 \\ (dm_6 - 136,03) * 0,03 \\ (dm_7 - 196,99) * 0,02 \\ (dm_8 - 24,4) * 1 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0,38 \\ 0,38 \\ 0,38 \\ 0,38 \\ 0,38 \\ 0,37 \\ 0,38 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Équation 11}$$

La performance de ce sous-modèle est donnée dans la Figure 90.

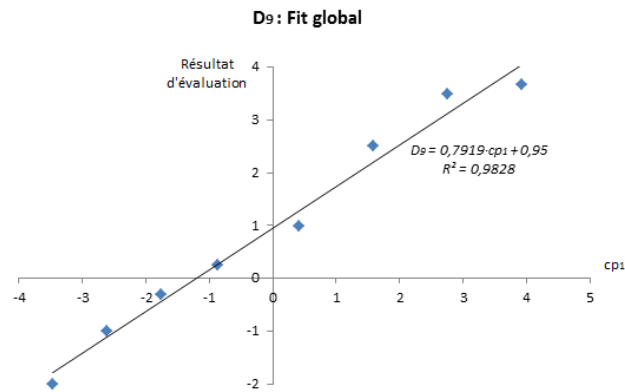


Figure 90 : Performance du modèle de la régression linéaire pour le descripteur D_9 .

Par l'intermédiaire des modèles créés pour tous les descripteurs sensoriels, nous pouvons prévoir la perception du fit du vêtement virtuel sur le porteur. Lors de la réception d'une nouvelle donnée, comprenant une nouvelle gradation exprimée par un ensemble de mensurations du vêtement 3D $MV = \{mv_1, \dots, mv_s\}$, et un nouveau porteur avec un ensemble des mensurations aux mêmes positions $MM = \{mm_1, \dots, mm_s\}$, nous calculons $DM = \{dm_1, \dots, dm_s\}$, soit l'ensemble des écarts entre les mensurations de MM et celles de MV . Ensuite, nous introduisons les résultats de calcul dans les p sous-modèles afin de prévoir la perception du fit pour chaque descripteur sensoriel D_k ($k \in \{1, \dots, p\}$) (Figure 91).

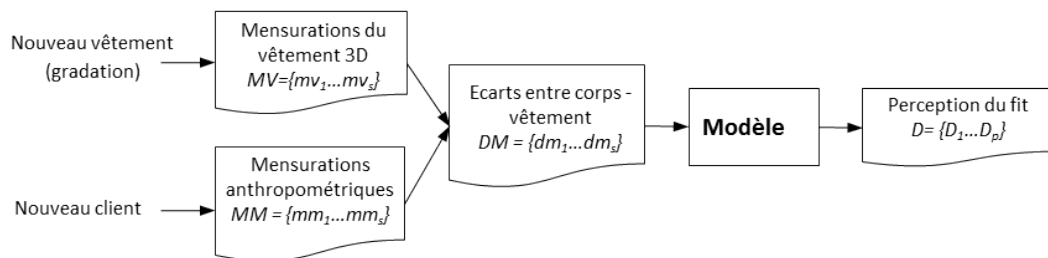


Figure 91 : Prévision du fit d'un nouveau vêtement (nouvelle gradation).

Les modèles précédents permettent également de modifier les patrons existants à partir des résultats d'évaluation du fit du vêtement virtuel sur le porteur, afin d'obtenir les nouveaux patrons personnalisés ou adaptés. La procédure générale est décrite comme suit (Figure 92).

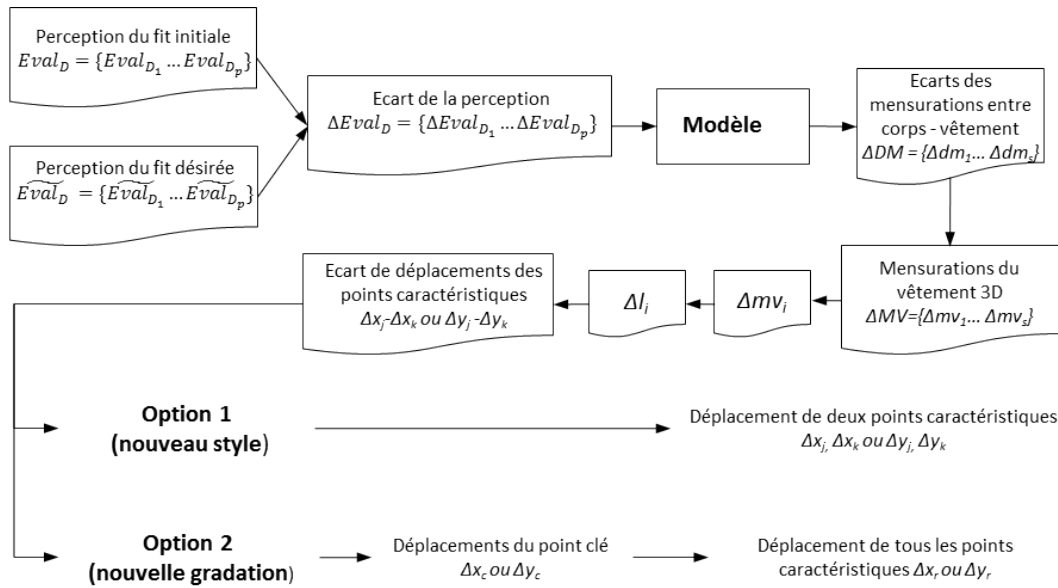


Figure 92 : Génération d'un patron adapté à un porteur spécifique à partir de la prévision du fit d'un vêtement existant.

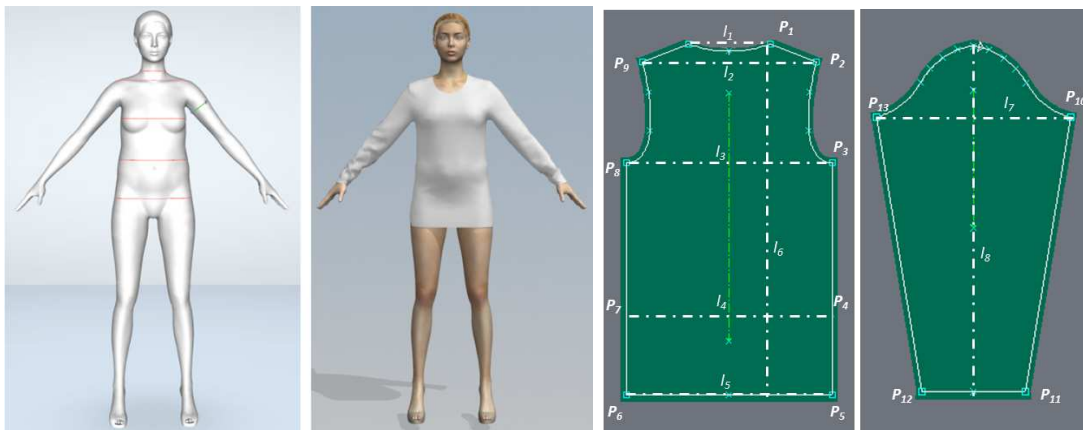


Figure 93 : Un nouveau porteur et le fit du vêtement virtuel sur son corps.

Par exemple, nous prenons le vêtement et le mannequin de la Figure 93. Supposons que la perception estimée du vêtement soit :

$$\{Eval_{D_1}: 0, \quad Eval_{D_2}: 0,74, \quad Eval_{D_3}: -0,13, \quad Eval_{D_4}: 0,12, \quad Eval_{D_5}: 2,25, \\ Eval_{D_6}: 1,64, \quad Eval_{D_7}: 0,25, \quad Eval_{D_8}: -0,24, \quad Eval_{D_9}: 0,18\}$$

Si le consommateur souhaite une perception du fit améliorée selon plusieurs descripteurs sensoriels :

$$Eval_{D_2}: 0,74 \rightarrow \widetilde{Eval}_{D_2}: 0$$

$$Eval_{D_5}: 2,25 \rightarrow \widetilde{Eval}_{D_5}: 0$$

$$Eval_{D_6}: 1,64 \rightarrow \widetilde{Eval}_{D_6}: 0$$

Alors nous modifions, d'abord, les patrons du vêtement sur le descripteur sensoriel D_2 . Et selon le sous-modèle concerné, $D_2 = 0,0148 \cdot dm_2 + 0,1979$, nous calculons la variation de la mensuration du vêtement Δmv_2 par :

$$\begin{aligned}\Delta mv_2 = \Delta dm_2 &= \Delta Eval_{D_2} / 0,0148 = \left(\frac{\widetilde{Eval}_{D_2} - Eval_{D_2}}{0,0148} \right) \\ &= (0 - 0,74) / 0,0148 = -50\end{aligned}$$

Ensuite, nous calculons la modification de la ligne de caractéristique, Δl_2 , à partir de la relation entre la mensuration du vêtement 3D et la ligne caractéristique.

$$\Delta l_2 = (\Delta dm_2) / 2 = (-50) / 2 = -25$$

Cette variation sera prise en compte par déplacements simultanés et symétriques des deux points caractéristiques associés P2 et P9 (Figure 93) vers l'intérieur du patron dans le sens x. Ces déplacements symétriques sont exprimés respectivement par Δx_2 et Δx_9 , dont chacun correspond à la moitié de Δl_2 . Soit :

$$\Delta x_2 = (\Delta l_2) / 2 = -12,5, \text{ et } \Delta x_9 = -(\Delta l_2) / 2 = 12,5$$

Les autres points caractéristiques restent à leur position initiale.

De cette manière, nous calculons les déplacements des points caractéristiques pour les autres descripteurs D_5 et D_6 , afin d'obtenir un patron désiré et personnalisé. Le nouveau vêtement présentant un style nouveau est montré à la Figure 94. Nous constatons que le nouveau vêtement donne un rendu amélioré au niveau de l'épaule (D_2), de la longueur du vêtement (D_5) et de la longueur de manche (D_6).

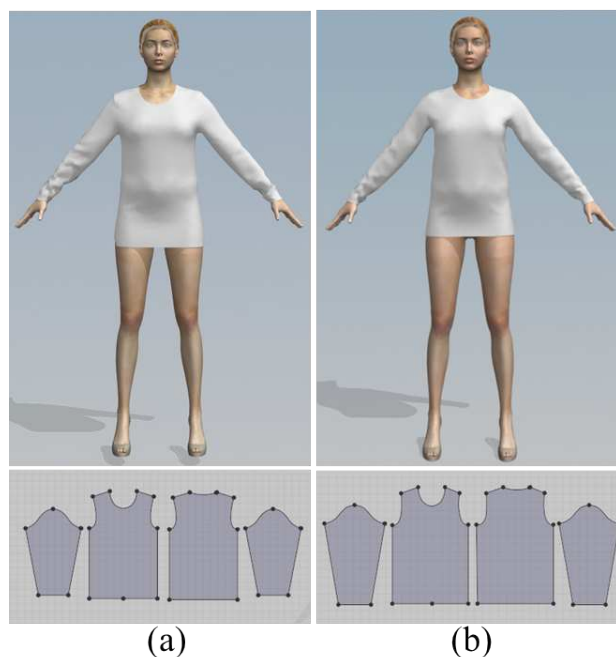


Figure 94 : Comparaison des vêtements et des patrons associés. (a) vêtement initial ; (b) nouveau vêtement (nouveau style).

3 Technique de création pour les stylistes et modélistes

Le design et le bien aller d'un vêtement jouent un rôle majeur pour l'industrie du textile-habillement. Les consommateurs sont en général attirés par un style ajusté et des couleurs très tendances. Ces critères sont essentiels car ils interviennent dans l'acte d'achat d'un vêtement. Afin de développer un produit ajusté à la morphologie du consommateur,

designers et modélistes doivent modifier plusieurs fois leurs styles et patrons afin de satisfaire les exigences des consommateurs. Actuellement, trois inconvénients majeurs apparaissent dans le processus de création et d'évaluation d'un vêtement : il est très coûteux en temps pour une efficacité moindre, il est subordonné à l'expérience des designers et modélistes, il n'est pas adapté au e-commerce. Afin de résoudre ces trois problématiques, nous avons développé deux technologies avec l'outil numérique. Ces travaux sont menés dans le cadre de la thèse de LIU Kaixuan en collaboration avec l'université de Donghua.

3.1 Technique de design pour le dessin de styliste et le patronage en 2D

La première technique consiste à développer un outil pour le styliste et le modéliste. L'idée est de créer le dessin de style selon la demande du créateur et les différents patrons en tenant compte des mesures anthropométriques du mannequin. La Figure 95 illustre le schéma général de cet outil pour un process de design du pantalon jean.

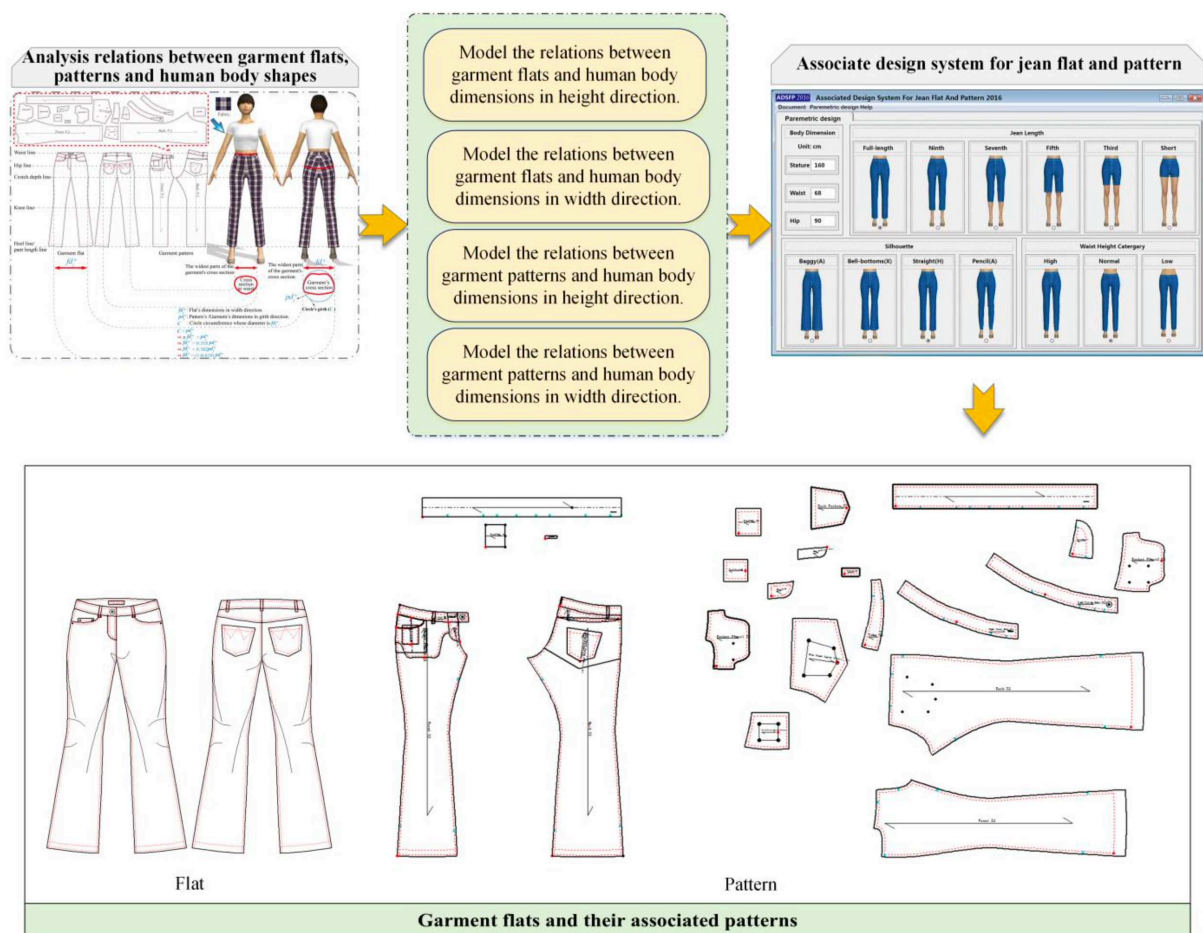


Figure 95 : Schéma général de l'outil de design pour le styliste et le modéliste.

La première étape est d'extraire les mesures anthropométriques indépendantes. Après l'analyse factorielle sur une base de données de 116 filles âgées de 20 à 30 ans dans le nord de la Chine, nous constatons qu'il y a deux groupes de mesures : facteur de hauteur (Figure 96) et facteur de contour (Figure 97).

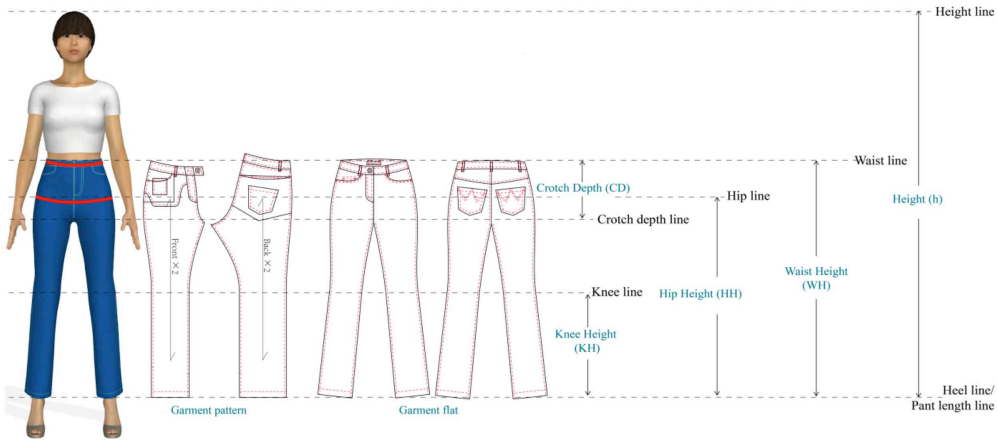


Figure 96 : Relations entre le dessin de style, les patrons et les mesures anthropométriques (facteur de hauteur).

W_p^f is half of Waist girth of front pattern piece. WW_f is flat's Waist Width.
 W_p^b is half of Waist girth of back pattern piece. HW_f is flat's Hip Width.
 H_p^f is half of Hip girth of front pattern piece. e_w is Ease allowance at waist.
 H_p^b is half of Hip girth of back pattern piece. e_h is Ease allowance at hip.
 W_p is pattern's Waist girth. C_w is a Circle girth, its diameter equals to WW_f .
 W_b is human body's Waist girth. C_h is a Circle girth, its diameter equals to HW_f .
 H_p is pattern's Hip girth. 0.618 is golden ratio.
 H_b is human body's Hip girth.
 π is Pi, ratio of the circumference of a circle to its diameter.

Figure 97 illustrates the relationship between a fashion design, garment patterns, and anthropometric measurements based on body contour. On the left, a female model is shown wearing blue trousers. To her right, the 'Garment pattern' is shown in two pieces: 'Front X 2' and 'Back X 2'. Further right, the 'Garment flat' is shown as a single piece. On the far right, a vertical scale indicates key measurements: 'Height line' at the top, 'Waist line', 'Hip line', 'Knee line', and 'Heel line/Pant length line' at the bottom. Specific measurements are labeled: 'Crotch Depth (CD)', 'Crotch depth line', 'Knee Height (KH)', 'Hip Height (HH)', 'Waist Height (WH)', and 'Height (h)'.

Cross section at waist

$W_p = 2(W_p^f + W_p^b)$
 $W_p = W_b + e_w$
 $C_w > W_f$
 $\Rightarrow \pi WW_f > W_p$
 $\Rightarrow WW_f > W_p / \pi$
 $\Rightarrow WW_f > 0.318W_p$
 $\Rightarrow WW_f \approx 0.382W_p$
 $\Rightarrow WW_f \approx 0.382(W_b + e_w)$
 $\Rightarrow WW_f \approx (1-0.618)(W_b + e_w)$

Cross section at hip

$H_p = 2(H_p^f + H_p^b)$
 $H_p = H_b + e_h$
 $C_h > H$
 $\Rightarrow HW_f > \pi H_p$
 $\Rightarrow HW_f > H_p / \pi$
 $\Rightarrow HW_f > 0.318H_p$
 $\Rightarrow HW_f \approx 0.382H_p$
 $\Rightarrow HW_f \approx 0.382(H_b + e_h)$
 $\Rightarrow HW_f \approx (1-0.618)(H_b + e_h)$

Front flat

Front pattern

Back pattern

Back flat

Figure 97 : Relations entre le dessin de style, les patrons et les mesures anthropométriques (facteur de contour).

Les relations entre les mesures anthropométriques peuvent être identifiées par la régression linéaire. (Équation 12 et Équation 13)

$$\begin{aligned}
WH_p &= WH_f = 0,745h - 19,344 \\
HH_p &= HH_f = 0,686h - 28,210 \\
CD_p &= CD_f = 0,532h - 14,478 \\
KH_p &= KH_f = 0,367h - 15,911
\end{aligned}$$

Équation 12

où h est la hauteur du mannequin, WH est la hauteur de la taille, HH est la hauteur de la hanche, CD est la hauteur de l'entrejambe, KH est la hauteur du genou, p représente le patron, f représente le dessin de style.

$$\begin{aligned}
W_p &= W_b + e_w \\
H_p &= H_b + e_h \\
K_p &= 0,4H_b + c_k \\
LO_p &= 0,4H_b - c_{lo} \\
WW_f &= (1 - 0,618)(W_b + e_w) \\
HW_f &= (1 - 0,618)(H_b + e_h) \\
KW_f &= (1 - 0,618)(0,4H_b + c_k) \\
LOW_f &= (1 - 0,618)(0,4H_b + c_{lo})
\end{aligned}$$

Équation 13

où W_p , H_p , K_p et LO_p sont les contours de la taille, de la hanche, du genou et de l'entrejambe du patron ; WW_f , HW_f , KW_f et LOW_f sont les largeurs de dessin au niveau de la taille, de la hanche, du genou et de la largeur de l'ouverture de la jambe ; e_w et e_h sont les aisances du vêtement au niveau de la taille et de la hanche; c_k et c_{lo} sont les constantes au niveau du genou et de la largeur de l'ouverture de la jambe.

Selon le style ou encore le design du vêtement, les paramètres du dessin de style et des patrons doivent être réajustés (Figure 98). Nous avons développé un logiciel pour générer automatiquement les dessins et les patrons du pantalon de jean selon le choix de l'utilisateur (Figure 99). De plus, nous avons fabriqué trois pantalons jean réels sur la base des patrons générés (Figure 100).

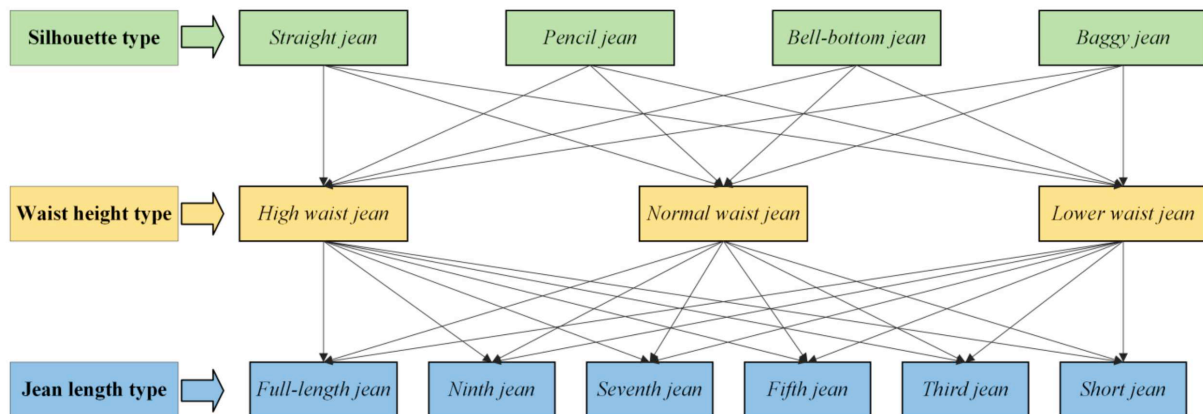


Figure 98 : Classification de style du pantalon de jean.

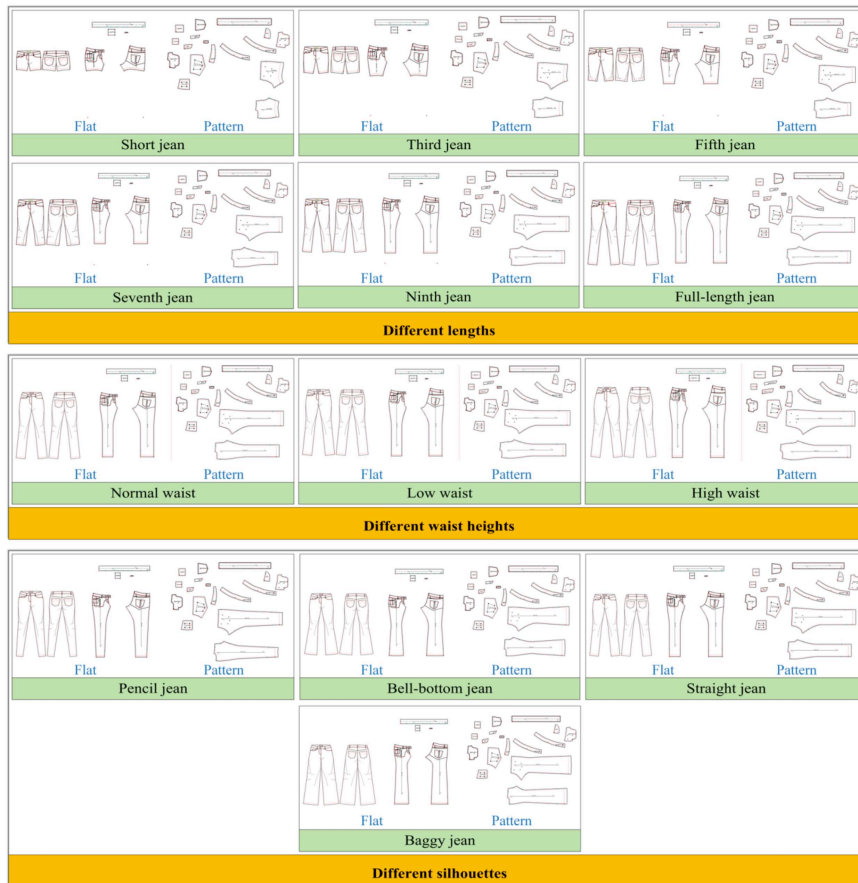


Figure 99 : Exemple de design des dessins et des patrons pour différents styles de pantalon jean.

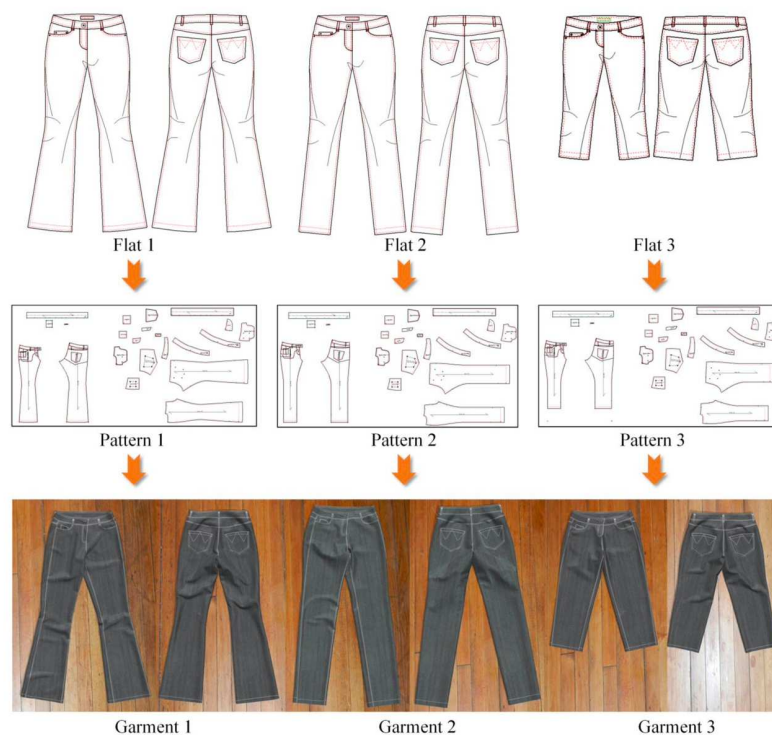


Figure 100 : Trois pantalons jean fabriqués à la base des patrons générés par le logiciel.

3.2 Technique interactive de patronage dans un logiciel CAO en 3D

La technique de coupe est le travail le plus délicat dans le processus de conception et de production du vêtement. Elle relie le design de mode et la confection. Actuellement, la création de patrons est encore un travail fortement expérimenté. Récemment les logiciels de CAO montrent une possibilité de conception de vêtements avec une efficacité exceptionnelle liée aux méthodes de conception traditionnelle. Cependant, les interventions manuelles par le créateur sont actuellement inévitables suite à un manque de connaissances du transfert des données humaines vers l'outil informatique. C'est pour cette raison que nous avons développé une technologie interactive pour le créateur afin de réaliser un patronage dans un logiciel de CAO en 3D. Cette technologie s'effectue en trois étapes : création des lignes de contour du vêtement en 3D, réalisation des lignes de création sur le vêtement en 3D et la mise à plat les patrons en 2D (Figure 101).

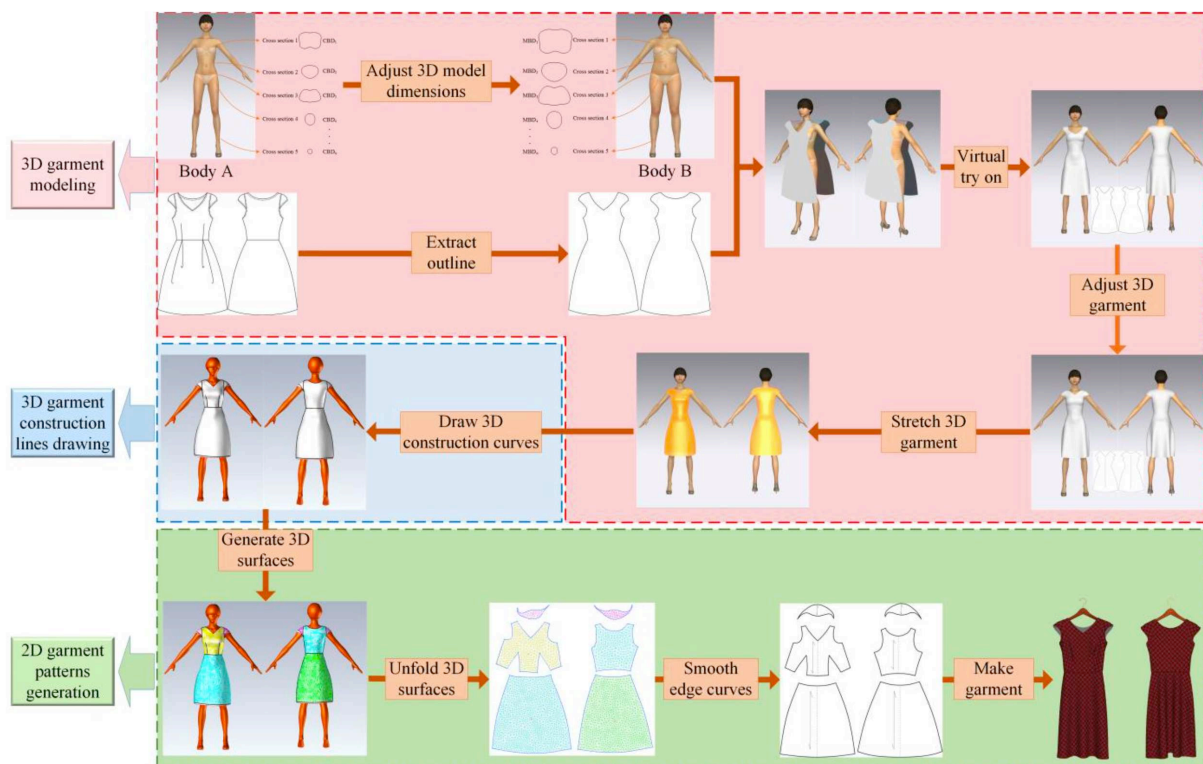


Figure 101 : Procédure de design d'un patron dans un environnement 3D.

Les lignes de contour d'un vêtement peuvent être générées par plusieurs méthodes disponibles [101]–[106]. Le vêtement en 3D peut ensuite être généré en 3D par le logiciel de CAO. Après les processus de « stretching » et « freezing », le créateur peut tracer directement les lignes de style/coupe sur la surface du vêtement. Ces deux processus sont disponibles dans la plupart des logiciels de CAO en confection. Les lignes de style/coupe permettent de couper une grande surface en différents patrons, appelés empiècement, et créer des crans de montage sur chaque patron. A la fin, les patrons du vêtement peuvent être réalisés suite à la mise à plat de chaque surface (empiècement) dans un autre logiciel de CAO en confection.

4 Modélisation d'évaluation de fit à la base de machine learning

Dans le cadre de la thèse de LIU Kaixuan, nous avons amélioré le procès de modélisation d'évaluation de fit en tenant compte des valeurs de pression générées dans le logiciel de CAO (Figure 102). Les entrées du modèle sont les valeurs de pression sur les différentes positions pendant l'essayage virtuel et les sorties sont les notes d'évaluation de fit selon l'essayage réel. Même si les valeurs de pression ne peuvent pas être identifiées comme des valeurs réelles, elles possèdent une corrélation positive avec le fit du vêtement réel. C'est-à-dire que la valeur de pression est élevée sur un point du vêtement lorsque ce point est serré pendant l'essayage réel, et vice-versa [107]–[109].

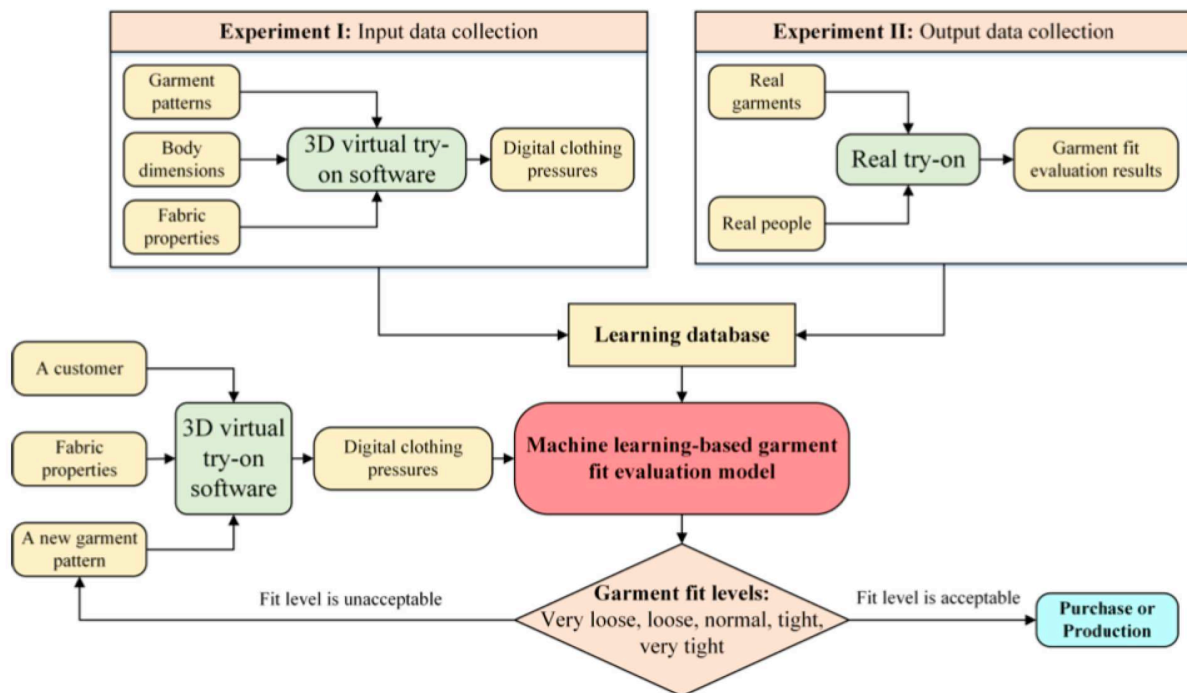


Figure 102 : Schéma générale du procès de modélisation d'évaluation de fit.

Neuf types de morphotypes et 72 tailles des pantalons sont choisis pour les essayages réels et virtuels. Pour le scénario d'essayage réel, le paneliste impose 5 postures différentes et donne une valeur de fit entre 1 et 5 (très grand – très serré) (Figure 103). Pour chaque essayage virtuel, les valeurs de pression sur 20 points sont collectées (Figure 104). Trois techniques de modélisation d'évaluation de fit sont mises en place : la naïve bayésienne, le réseau de neurones artificiels et l'arbre de décision avec l'algorithme C4.5. Les précisions de prédiction après la validation croisée à 10 blocs sont récapitulées dans le Tableau 33. Toutes les techniques donnent une précision élevée (>80%), qui est beaucoup mieux que la précision de l'essayage réel sur le vêtement fabriqué par la technique traditionnelle [110]–[112].



Figure 103 : Procédure de l’essayage réel de cinq postures pour 72 pantalons.

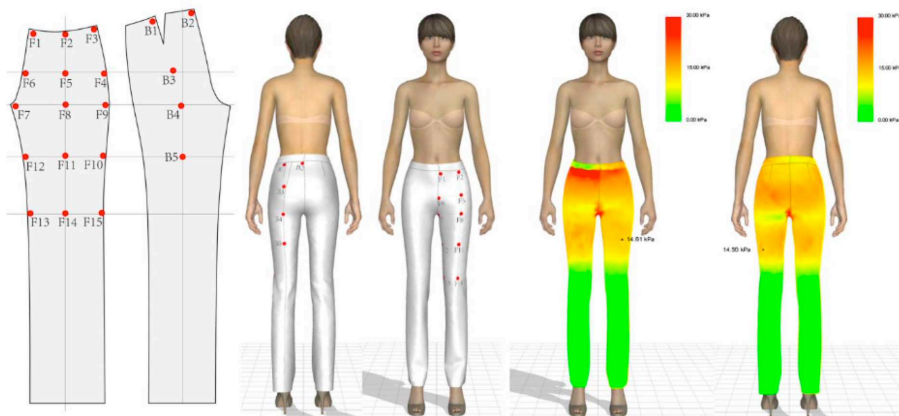


Figure 104 : Positions des 20 points pour obtenir les valeurs de pression.

Tableau 33 : Résultat de précision de prédiction calculé par la validation croisée à 10 blocs.

Modèle	Précision de prédiction
Naïve bayésienne	80,6%
Réseau de neurones artificiels	83,3%
Arbre de décision	81,9%

Ce modèle peut être utilisé pour développer une plateforme de vente de vêtements en ligne (Figure 105). Pour un client quelconque, un mannequin virtuel paramétrique est choisi pour être adapté ou ajusté aux dimensions réelles du corps du client. Ensuite, nous cherchons les patrons de vêtements dans la base de données selon la dimension du corps du client. Après l’essayage virtuel, les pressions sur certains points sont utilisées comme les entrées du modèle pour prédire le niveau de fit. Si le résultat prévu répond aux exigences du client, nous recommandons au client concerné d’acheter ce vêtement. Sinon, il sera invité à en choisir un autre avec une taille ou un style différent. Cette procédure se répète jusqu’à la satisfaction du résultat.

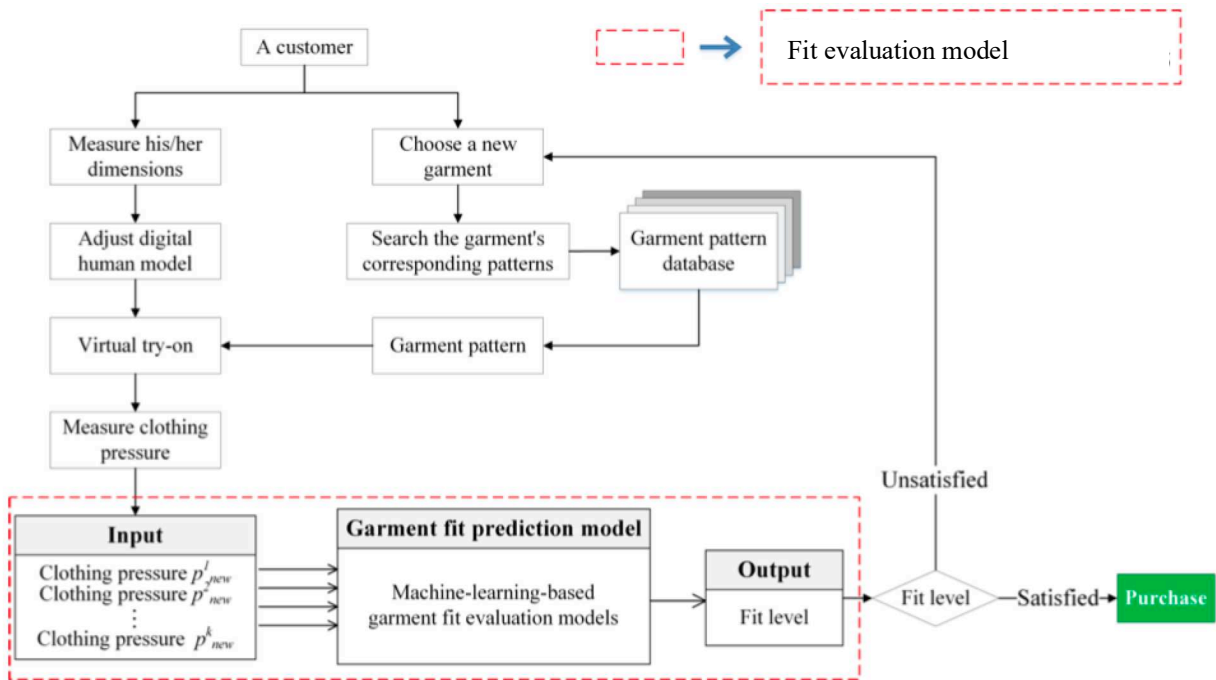


Figure 105 : Procédure du scénario de vente de vêtements en ligne.

5 Conclusion

Dans le cadre des travaux menés sur la conception orientée vers les interactions homme-machine, sur les plateformes numériques de co-crédation de vêtements, nous avons tout d'abord testé plusieurs logiciels de CAO en confection pour nos études sur l'essayage virtuel.

Pour développer une plateforme de « co-crédation », nous avons proposé deux modèles : l'un pour la modélisation de la relation entre les paramètres techniques du textile et la perception virtuelle du matériau et l'autre pour la modélisation de la relation entre les paramètres des patrons et la perception du fit d'un vêtement virtuel.

Ensuite, nous avons proposé deux techniques. La première est destinée aux modélistes et stylistes pour qu'ils puissent rapidement générer les dessins de style et les patrons en tenant compte des mesures anthropométriques du porteur. La deuxième est de générer les patrons par le logiciel de CAO en confection directement dans un environnement 3D.

Finalement nous avons modélisé la relation entre les patrons et le fit en tenant compte des pressions générées dans le logiciel de CAO en confection.

Les activités sur le développement de la plateforme « co-crédation » ont été valorisées par 9 publications et 4 communications dans des conférences scientifiques internationales.

Conclusion générale et perspectives

Nous vivons à l'ère numérique et les technologies numériques se développent rapidement et les industries attirent leurs clients avec de nouvelles techniques et des gammes de produits personnalisés. Cette tendance a accru le développement de nouveaux domaines hybrides pour la satisfaction des clients. L'utilisation des textiles comme élément d'usure a une vaste histoire dans l'évolution humaine depuis les temps anciens. Le concept de porter du tissu a commencé comme le remplacement de la feuille utilisée pour couvrir le corps, mais maintenant, les vêtements textiles ont plusieurs fonctions incluses. À l'ère actuelle de la concurrence et pour attirer plus de clients, nous pouvons constater de nombreuses valeurs ajoutées. Initialement, ces concepts sont partis de l'industrie militaire pour utiliser les capteurs intégrés dans les vestes mais pour le moment, ceux-ci ne sont pas limités à ce seul domaine. De nos jours, ces textiles, dits « textiles intelligents », définis par l'utilisateur sont utilisés dans divers domaines allant des projets médicaux, sportifs, militaires et de différents projets liés au loisir. Par conséquent, le textile n'est pas une industrie indépendante, mais un mélange de différents secteurs tels que matériau, électronique, automatique, conception industrielle, etc. Les textiles intelligents peuvent comprendre un ou plusieurs composants textiles ou non textiles qui ont été tissés, brodés, cousus ou attachés en utilisant différentes techniques disponibles. En fonction des besoins, ces composants peuvent inclure des capteurs, des actionneurs, des microcontrôleurs, des dispositifs de récupération d'énergie et de transmission de puissance. Ces textiles sont normalement appelés textiles intelligents, e-textiles, textiles électroniques, vêtements intelligents et textronics, etc.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres. Le premier chapitre a synthétisé mes activités de recherches, d'enseignements et administratives depuis 2007 à l'ENSAIT. Le deuxième chapitre est consacré à mon travail sur les textiles électroniques. Le troisième chapitre décrit mon travail sur les intégrations des dispositifs électroniques dans les structures textiles. Le quatrième chapitre concerne mes travaux sur la fiabilité, la durabilité et la lavabilité des systèmes textiles intelligents. Le dernier chapitre est consacré aux travaux sur la construction de la conception orientée vers les interactions homme-machine pour les plateformes numériques de co-création de vêtement.

Même si nous avons fait beaucoup des efforts sur la recherche dans le domaine « Textiles Intelligents », il reste encore plusieurs pistes de travail à approfondir. Pour la partie des interfaces de connexion dans les textiles intelligents, nous avons développé le fil qui est compatible avec la technologie de broderie ainsi que la méthode de soudure pour intégrer les composants électroniques classiques, cependant la fiabilité de connexion entre le fil et les connecteurs de composant n'est pas encore étudiée. Suite à la tendance de miniaturisation des composants électroniques, le fil développé n'est compatible qu'avec les composants électroniques DIP avec une intervalle de 2,54 mm entre les pads. La question se pose « comment améliorer ce fil pour qu'il soit compatible aux autres composants avec d'autres types de package, par exemple SOIC, SSOP, TSOP, etc. »

Pour la partie de la lavabilité des systèmes intelligents avec le PCB flexible intégré, nous devons continuer à étudier l'influence de la taille du PCB sur le touché et les propriétés mécaniques de la structure textile. L'encapsulation des composants électroniques est un sujet très important pour réaliser un produit de textile intelligent fiable et prêt pour le marché.

En ce qui concerne la conception de plateforme de « co-crédation », nous avons travaillé sur la réalisation des modèles d'évaluation de fit et deux techniques de création pour les modélistes et stylistes. Notre méthode de l'évaluation du fit se base sur les valeurs de pression calculées dans un logiciel de CAO. Cependant, l'algorithme de calcul de ces valeurs est inconnu. Donc, la fiabilité de modèle dépend de la justesse des valeurs de pression. Afin d'obtenir un modèle pertinent entre le confort de fit et la pression de vêteinent, il est important d'obtenir les valeurs de pression réelles. Nous avons commencé à travailler sur l'intégration des capteurs de pression dans le vêteinent. Ces travaux devraient nous permettre d'obtenir une distribution de pressions sur le corps pour les scénarii statistiques et dynamiques.

Hormis le facteur du fit, le motif ou le dessin imprimé, qui dépendent de la tendance de mode, sont les facteurs importants lors de l'achat des vêteinents. Une thèse de doctorat a commencé pour classifier plusieurs dessins de mode et formaliser la connaissance basée sur ces dessins, afin de développer un système de recommandation pour les consommateurs.

De DeepBlue à AlphaGo, « machine learning » nous a montré sa compétence magique dans le domaine de « intelligence artificielle ». Pour réaliser un apprentissage fiable, cette technologie a besoin des données en vaste quantité. Cependant, il est coûteux d'avoir les données classées (labelled data). En équipant les vêteinents de capteurs et des systèmes e-textiles, la technologie de « machine learning » peut capter les données pendant leur durée de vie et leur utilisation quotidienne. Les textiles intelligents peuvent être utilisés pour capter les données des activités de mouvement, des signaux biologiques, des signaux environnementaux, etc. Ils deviennent ainsi un outil très puissant pour réaliser un système de classification.

Bibliographie

- [1] X. Tao *et al.*, « CO2 laser-induced crystallization of sol-gel-derived indium tin oxide films », *Appl. Phys. A*, vol. 96, n° 3, p. 741-749, août 2009, doi: 10.1007/s00339-009-5157-7.
- [2] X. Tao, V. Koncar, et C. Dufour, « Geometry Pattern for the Wire Organic Electrochemical Textile Transistor », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 158, n° 5, p. H572, mars 2011, doi: 10.1149/1.3562962.
- [3] X. Tao, V. Koncar, et D. Claude, « Realization of fibrous electrochemical transistors and textile electronic circuits », *Actual. Chim.*, n° 360-361, p. 65-68, févr. 2012.
- [4] R. Dufour *et al.*, « Electrowetting on functional fibers », *Soft Matter*, vol. 9, n° 2, p. 492-497, 2013, doi: 10.1039/C2SM26295A.
- [5] X. Tao et P. Bruniaux, « Toward advanced three-dimensional modeling of garment prototype from draping technique », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 25, n° 4, p. 266-283, janv. 2013, doi: 10.1108/09556221311326301.
- [6] C. Moretti, X. Tao, V. Koncar, et L. Koehl, « A Study on Electrical Performances and Lifetime of a Flexible Electrochromic Textile Device », *Autex Res. J.*, vol. 14, n° 2, p. 76-81, juin 2014, doi: 10.2478/aut-2014-0003.
- [7] X. Chen, X. Tao, X. Zeng, L. Koehl, et J. Boulenguez-Phippen, « Control and optimization of human perception on virtual garment products by learning from experimental data », *Knowl.-Based Syst.*, vol. 87, p. 92-101, oct. 2015, doi: 10.1016/j.knosys.2015.05.031.
- [8] K. Liu, J. Wang, X. Tao, X. Zeng, P. Bruniaux, et E. Kamalha, « Fuzzy classification of young women's lower body based on anthropometric measurement », *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 55, p. 60-68, sept. 2016, doi: 10.1016/j.ergon.2016.07.008.
- [9] K. Liu, X. Zeng, P. Bruniaux, J. Wang, E. Kamalha, et X. Tao, « Fit evaluation of virtual garment try-on by learning from digital pressure data », *Knowl.-Based Syst.*, vol. 133, p. 174-182, oct. 2017, doi: 10.1016/j.knosys.2017.07.007.
- [10] X. Tao, V. Koncar, T.-H. Huang, C.-L. Shen, Y.-C. Ko, et G.-T. Jou, « How to Make Reliable, Washable, and Wearable Textronic Devices », *Sensors*, vol. 17, n° 4, Art. n° 4, avr. 2017, doi: 10.3390/s17040673.
- [11] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, V. Koncar, D. Coulon, et J.-M. Tarlet, « Comparative Study on Conductive Knitted Fabric Electrodes for Long-Term Electrocardiography Monitoring: Silver-Plated and PEDOT:PSS Coated Fabrics », *Sensors*, vol. 18, n° 11, Art. n° 11, nov. 2018, doi: 10.3390/s18113890.
- [12] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, D. Coulon, et V. Koncar, « Washable and Reliable Textile Electrodes Embedded into Underwear Fabric for Electrocardiography (ECG) Monitoring », *Materials*, vol. 11, n° 2, Art. n° 2, févr. 2018, doi: 10.3390/ma11020256.
- [13] K. Liu *et al.*, « 3D interactive garment pattern-making technology », *Comput.-Aided Des.*, vol. 104, p. 113-124, nov. 2018, doi: 10.1016/j.cad.2018.07.003.
- [14] K. Liu *et al.*, « Parametric design of garment flat based on body dimension », *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 65, p. 46-59, mai 2018, doi: 10.1016/j.ergon.2018.01.013.

- [15] X. Tao, X. Chen, X. Zeng, et L. Koehl, « A customized garment collaborative design process by using virtual reality and sensory evaluation on garment fit », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 115, p. 683-695, janv. 2018, doi: 10.1016/j.cie.2017.10.023.
- [16] X. Tao, T.-H. Huang, C.-L. Shen, Y.-C. Ko, G.-T. Jou, et V. Koncar, « Bluetooth Low Energy-Based Washable Wearable Activity Motion and Electrocardiogram Textronic Monitoring and Communicating System », *Adv. Mater. Technol.*, vol. 3, n° 10, p. 1700309, 2018, doi: 10.1002/admt.201700309.
- [17] A. Ankhili, S. U. Zaman, X. Tao, C. Cochrane, V. Koncar, et D. Coulon, « How to Connect Conductive Flexible Textile Tracks to Skin Electrocardiography Electrodes and Protect Them Against Washing », *IEEE Sens. J.*, vol. 19, n° 24, p. 11995-12002, déc. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2938333.
- [18] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, V. Koncar, D. Coulon, et J.-M. Tarlet, « Ambulatory Evaluation of ECG Signals Obtained Using Washable Textile-Based Electrodes Made with Chemically Modified PEDOT:PSS », *Sensors*, vol. 19, n° 2, Art. n° 2, janv. 2019, doi: 10.3390/s19020416.
- [19] E. Ismar, S. uz Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Effect of Water and Chemical Stresses on the Silver Coated Polyamide Yarns », *Fibers Polym.*, vol. 20, n° 12, p. 2604-2610, déc. 2019, doi: 10.1007/s12221-019-9266-4.
- [20] K. Liu, X. Zeng, X. Tao, et P. Bruniaux, « Associate Design of Fashion Sketch and Pattern », *IEEE Access*, vol. 7, p. 48830-48837, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906261.
- [21] K. Liu, C. Zhu, X. Tao, P. Bruniaux, et X. Zeng, « Parametric design of garment pattern based on body dimensions », *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 72, p. 212-221, juill. 2019, doi: 10.1016/j.ergon.2019.05.012.
- [22] S. U. ZAMAN, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Launderability of Conductive Polymer Yarns Used for Connections of E-textile Modules: Mechanical Stresses », *Fibers Polym.*, vol. 20, n° 11, p. 2355-2366, nov. 2019, doi: 10.1007/s12221-019-9325-x.
- [23] K. Wang, V. Kumar, X. Zeng, L. Koehl, X. Tao, et Y. Chen, « Development of a Textile Coding Tag for the Traceability in Textile Supply Chain by Using Pattern Recognition and Robust Deep Learning », *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol. 12, n° 2, p. 713-722, mai 2019, doi: 10.2991/ijcis.d.190704.002.
- [24] J. Hao, A. Djouadi, F. Rault, X. Tao, É. Lheurette, et L. Burgnies, « Multiresonant Split Ring Resonator with Meandered Strips », *Phys. Status Solidi A*, vol. 217, n° 6, p. 1901017, 2020, doi: 10.1002/pssa.201901017.
- [25] E. Ismar, X. Tao, F. Rault, F. Dassonville, et C. Cochrane, « Towards Embroidered Circuit Board From Conductive Yarns for E-Textiles », *IEEE Access*, vol. 8, p. 155329-155336, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018759.
- [26] S. uz Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Understanding the Washing Damage to Textile ECG Dry Skin Electrodes, Embroidered and Fabric-Based; set up of Equivalent Laboratory Tests », *Sensors*, vol. 20, n° 5, Art. n° 5, janv. 2020, doi: 10.3390/s20051272.
- [27] A. Dubey, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Textile Based Three-Layer Robust Flexible and Stable Electrochromic Display », *IEEE Access*, vol. 8, p. 182918-182929, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028655.

- [28] S. uz Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « E-Textile Systems Reliability Assessment—A Miniaturized Accelerometer Used to Investigate Damage during Their Washing », *Sensors*, vol. 21, n° 2, Art. n° 2, janv. 2021, doi: 10.3390/s21020605.
- [29] S. Eryuruk, H. Gidik, V. Koncar, F. Kalaoglu, X. Tao, et Y. Saglam, « Heat and moisture transfer properties of a firefighter clothing with a new fire-resistant underwear », *J. Ind. Text.*, p. 1528083721993775, févr. 2021, doi: 10.1177/1528083721993775.
- [30] C. MORETTI, X. TAO, L. Koehl, et V. KONCAR, « Electrochromic textile displays for personal communication », in *Smart Textiles and their Applications*, Woodhead Publising, 2016, p. 539-568.
- [31] X. TAO et V. KONCAR, « Textile electronic circuits based on organic fibrous transistors », in *Smart Textiles and their Applications*, Woodhead Publising, 2016, p. 569-598.
- [32] K. Liu, X. Zeng, P. Bruniaux, X. Tao, E. Kamalha, et J. Wang, « Garment Fit Evaluation Using Machine Learning Technology », in *Artificial Intelligence for Fashion Industry in the Big Data Era*, S. Thomassey et X. Zeng, Éd. Singapore: Springer, 2018, p. 273-288.
- [33] X. Tao, V. Koncar, C. Dufour, N. Onar, et A. Akşit, « STRUCTURAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF PET NONWOVEN FABRICS COATED WITH PYRROLE/ANILINE COPOLYMERS », *J. Text. Eng.*, vol. 15, p. 72, 2008.
- [34] X. Tao, V. Koncar, C. Dufour, N. Onar, et A. Aksit, « Coating of polyethylene terephthalate nonwoven fabrics with indium zinc oxide solutions at low temperature by sol-gel process », *J. Text. Eng.*, vol. 17, p. 79-1-6, 2010.
- [35] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, D. Coulon, et V. Koncar, « Study on the Measurement Method of Skin Textile Electrodes Contact Impedance », *J. Fash. Technol. Text. Eng.*, vol. 2018, mars 2019, doi: 10.4172/2329-9568.S5-004.
- [36] A. ANKHILLI, S. U. ZAMAN, X. TAO, C. COCHRANE, V. KONCAR, et D. COULON, « Washable embroidered textile electrodes for long-term electrocardiography monitoring », *Text. Leather Rev.*, vol. 2, n° 3, p. 126-135, 2019.
- [37] X. Tao, A. BEAURAIN, C. DUFOUR, M. LEWANDOWSKI, et V. KONCAR, « THE STUDY ON ELECTRICAL PROPERTIES OF FIBRES COATED BY SOL-GEL DERIVED INDIUM-TIN-OXIDE UNDER LOW ANNEALING TEMPERATURE », présenté à AUTEX 2008, Biella, Italy, juin 2008.
- [38] X. Tao, V. Koncar, et C. Dufour, « Novel geometry pattern for wire organic electrochemical textile transistor », présenté à 10th World Textile Conference (AUTEX 2010), Vilnius, Lithuania, juin 2010.
- [39] C. Moretti, F. Kelly, V. KONCAR, X. TAO, et L. Koehl, « CONTRIBUTION TO THE CREATION AND COMMAND OF TEXTILE ELECTROCHROMIC DEVICES », présenté à 10th World Textile Conference (AUTEX 2013), Dresden, Germany, mai 2013.
- [40] C. Moretti, X. Tao, V. Koncar, et L. Koehl, « Study on electrical performances of a flexible electrochromic textile device », présenté à International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2013), Roubaix, France, oct. 2013.
- [41] X. Chen, X. Tao, et X. Zeng, « Control and optimization of Human Perception on Virtual Garments by Adjusting Technical Parameters of the Corresponding CAD Software », présenté à Conference on Human Factors in Computing Systems 2014, Toronto, Canada, mai 2014.

- [42] X. Chen, X. Zeng, L. Koehl, X. Tao, et J. Boulenguez-Phippen, « Optimization of Human Perception on Virtual Garments by Modeling the Relation between Fabric Properties and Sensory Descriptors Using Intelligent Techniques », in *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Montpellier, France, juill. 2014, p. 606-615, doi: 10.1007/978-3-319-08855-6_61.
- [43] C. Moretti, V. Koncar, L. Koehl, et X. Tao, « Innovative methodology for electrochromic color change evaluation », présenté à AUTEX 2014, Bursa, Turkey, mai 2014.
- [44] I. Jerkovic *et al.*, « E-GLASS/POLYPROPYLENE SENSOR YARNS DEVELOPED BY ROLL TO ROLL COATING PROCEDURE », présenté à 5th International Conference on Intelligent Textiles & Mass Customisation, Casablanca, Morocco, nov. 2015.
- [45] K. Liu, J. Wang, X. Zeng, X. Tao, et P. Bruniaux, « Garment fit evaluation based on bayesian discriminant », in *Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making*, Roubaix, France, août 2016, vol. Volume 10, p. 990-995, doi: 10.1142/9789813146976_0153.
- [46] K. Liu, J. Wang, X. Zeng, X. Tao, et P. Bruniaux, « Using artificial intelligence to predict human body dimensions for pattern making », in *Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making*, Roubaix, France, août 2016, vol. Volume 10, p. 996-1001, doi: 10.1142/9789813146976_0154.
- [47] A. Ankhili, X. Tao, C. Cochrane, V. Koncar, et D. Coulon, « Washable and reliable textile electrodes embedded into underwear for ECG monitoring », présenté à International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2017), Ghent, Belgium, oct. 2017, doi: 10.4172/2329-9568.S4-010.
- [48] T.-H. Huang *et al.*, « A Novel Design of E-Textile Integration for Physiological Monitoring and Lighting », présenté à International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2017), Ghent, Belgium, oct. 2017, doi: 10.4172/2329-9568.S4-010.
- [49] D. Matsouka, X. Tao, V. Koncar, S. Vassiliadis, D. Goustouridis, et F. Dassonville, « Towards the washable electronic textile device », présenté à International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2017), Ghent, Belgium, oct. 2017, doi: 10.4172/2329-9568.S4-010.
- [50] S. H. Eryuruk, V. Koncar, F. Kalaoglu, H. Gidik, et X. Tao, « Thermal comfort properties of firefighters' clothing with underwear », in *Thermal comfort properties of firefighters' clothing with underwear*, Lesvos, Greece, sept. 2018, vol. 459, p. 012040, doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012040.
- [51] D. Matsouka *et al.*, « Electrical connection issues on wearable electronics », in *Electrical connection issues on wearable electronics*, Lesvos, Greece, sept. 2018, vol. 459, p. 012017, doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012017.
- [52] S. U. Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Market readiness of smart textile structures - reliability and washability », in *Market readiness of smart textile structures - reliability and washability*, Lesvos, Greece, sept. 2018, vol. 459, p. 012071, doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012071.
- [53] K. Wang, X. Zeng, L. Koehl, X. Tao, et Y. Chen, « Statistical based approach for uncertainty analysis in life cycle assessment: a case study in textile industry », in *2019 IEEE*

International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), juin 2019, p. 1-4, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858952.

[54] S. U. Zaman, X. Tao, C. Cochrane, et V. Koncar, « Development of E-textile electrodes: washability and mechanical stresses », in *Development of E-textile electrodes: washability and mechanical stresses*, Marrakech, Morocco, nov. 2019, vol. 827, p. 012025, doi: 10.1088/1757-899X/827/1/012025.

[55] J. Hao *et al.*, « Embroidered split ring resonator antenna », présenté à 19th World Textile Conference on Textiles, Ghent, Belgium, juin 2019.

[56] K. Wang, X. Zeng, Y. Chen, L. Koehl, et X. Tao, « General architecture and methodology for the development of a traceability information management platform for smart manufacturing: Insights from the textile dyeing industry », in *Developments of Artificial Intelligence Technologies in Computation and Robotics*, Cologne, Germany, juin 2020, vol. Volume 12, p. 573-580, doi: 10.1142/9789811223334_0069.

[57] J. Hao *et al.*, « Antenne textile à motif métamatériau brodé », présenté à Journées Nationales Microondes (JNM 2019), Caen, France, mai 2019.

[58] X. Tao, « Textile electronics », 2020 E-Textiles Europe Virtual Summit, nov. 19, 2020.

[59] X. Tao, V. Koncar, C. Dufour, et D. Vuillaume, « A new geometry pattern for the wire organic electrochemical textile transistor on a nature fiber », présenté à International Conference on Organic Electronics, ICOE 2010, Paris, 2010, Consulté le: oct. 30, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00574087>.

[60] L. Burgnies *et al.*, « Matériaux conducteurs pour les antennes patches textiles », présenté à XXIèmes Journées Nationales Microondes, Caen, France, mai 2019.

[61] D. J. Macaya, M. Nikolou, S. Takamatsu, J. T. Mabeck, R. M. Owens, et G. G. Malliaras, « Simple glucose sensors with micromolar sensitivity based on organic electrochemical transistors », *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 123, n° 1, p. 374-378, avr. 2007, doi: 10.1016/j.snb.2006.08.038.

[62] C. G. Granqvist, « Introduction », in *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*, C. G. Granqvist, Éd. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1995, p. 1-15.

[63] P. R. Somani et S. Radhakrishnan, « Electrochromic materials and devices: present and future », *Mater. Chem. Phys.*, vol. 77, n° 1, p. 117-133, janv. 2003, doi: 10.1016/S0254-0584(01)00575-2.

[64] W. M. Kline, R. G. Lorenzini, et G. A. Sotzing, « A review of organic electrochromic fabric devices », *Color. Technol.*, vol. 130, n° 2, p. 73-80, 2014, doi: <https://doi.org/10.1111/cote.12079>.

[65] C. Cochrane, L. Meunier, F. M. Kelly, et V. Koncar, « Flexible displays for smart clothing: Part I—Overview », *IJFTR Vol364 Dec. 2011*, déc. 2011, Consulté le: nov. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/13237>.

[66] L. Meunier, F. M. Kelly, C. Cochrane, et V. Koncar, « Flexible displays for smart clothing: Part II— Electrochromic displays », *IJFTR Vol364 Dec. 2011*, déc. 2011, Consulté le: nov. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/13238>.

- [67] A. Corradini, A. M. Marinangeli, M. Mastragostino, et B. Scrosati, « Polydithienothiophene: A conducting polymer as electrochromic material », *Solid State Ion.*, vol. 28-30, p. 1738-1742, sept. 1988, doi: 10.1016/0167-2738(88)90453-5.
- [68] J. Nagai, G. D. McMeeking, et Y. Saitoh, « Durability of electrochromic glazing », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 56, n° 3, p. 309-319, janv. 1999, doi: 10.1016/S0927-0248(98)00140-8.
- [69] W. Lu, A. G. Fadeev, B. Qi, et B. Mattes, « Stable Conducting Polymer Electrochemical Devices Incorporating Ionic Liquids », 2003, doi: 10.1016/S0379-6779(02)00558-1.
- [70] C. M. Amb, A. L. Dyer, et J. R. Reynolds, « Navigating the Color Palette of Solution-Processable Electrochromic Polymers », *Chem. Mater.*, vol. 23, n° 3, p. 397-415, févr. 2011, doi: 10.1021/cm1021245.
- [71] A. K. Roy Choudhury, « 2 - Scales for communicating colours », in *Colour Measurement*, M. L. Gulrajani, Éd. Woodhead Publishing, 2010, p. 19-e3.
- [72] C. Kallmayer *et al.*, « New assembly technologies for textile transponder systems », in *53rd Electronic Components and Technology Conference, 2003. Proceedings.*, mai 2003, p. 1123-1126, doi: 10.1109/ECTC.2003.1216432.
- [73] I. Locher et G. Troster, « Fundamental Building Blocks for Circuits on Textiles », *IEEE Trans. Adv. Packag.*, vol. 30, n° 3, p. 541-550, août 2007, doi: 10.1109/TADVP.2007.898636.
- [74] T. Linz, M. von Krshiwoblozki, et H. Walter, « Novel Packaging Technology for Body Sensor Networks Based on Adhesive Bonding A Low Cost, Mass Producible and High Reliability Solution », in *2010 International Conference on Body Sensor Networks*, juin 2010, p. 308-314, doi: 10.1109/BSN.2010.56.
- [75] T. Linz, M. von Krshiwoblozki, H. Walter, et P. Foerster, « Contacting electronics to fabric circuits with nonconductive adhesive bonding », *J. Text. Inst.*, vol. 103, n° 10, p. 1139-1150, oct. 2012, doi: 10.1080/00405000.2012.664867.
- [76] E. P. Simon, C. Kallmayer, R. Aschenbrenner, et K. Lang, « Novel approach for integrating electronics into textiles at room temperature using a force-fit interconnection », in *18th European Microelectronics Packaging Conference*, sept. 2011, p. 1-7.
- [77] T. Linz, E. Simon, et H. Walter, « Fundamental analysis of embroidered contacts for electronics in textiles », in *3rd Electronics System Integration Technology Conference ESTC*, sept. 2010, p. 1-5, doi: 10.1109/ESTC.2010.5642823.
- [78] T. Linz, C. Kallmayer, R. Aschenbrenner, et H. Reichl, « Embroidering electrical interconnects with conductive yarn for the integration of flexible electronic modules into fabric », in *Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05)*, oct. 2005, p. 86-89, doi: 10.1109/ISWC.2005.19.
- [79] L. Buechley et M. Eisenberg, « Fabric PCBs, electronic sequins, and socket buttons: techniques for e-textile craft », *Pers. Ubiquitous Comput.*, vol. 13, n° 2, p. 133-150, févr. 2009, doi: 10.1007/s00779-007-0181-0.
- [80] L. Capineri, « Resistive Sensors with Smart Textiles for Wearable Technology: From Fabrication Processes to Integration with Electronics », *Procedia Eng.*, vol. 87, p. 724-727, janv. 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.748.

- [81] Myung-Jin Yim et Kyung-Wook Paik, « Design and understanding of anisotropic conductive films (ACF's) for LCD packaging », *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. Part A*, vol. 21, n° 2, p. 226-234, juin 1998, doi: 10.1109/95.705468.
- [82] M. Mizuno, M. Saka, et H. Abe, « Mechanism of electrical conduction through anisotropically conductive adhesive films », *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. Part A*, vol. 19, n° 4, p. 546-553, déc. 1996, doi: 10.1109/95.554936.
- [83] « Smart Textiles Market Size, Analysis, Share, Growth | Report 2024 », *Ameri Research Inc.* <https://www.ameriresearch.com/product/smart-textiles-market/> (consulté le janv. 18, 2021).
- [84] J. D. Ryan, D. A. Mengistie, R. Gabrielsson, A. Lund, et C. Müller, « Machine-Washable PEDOT:PSS Dyed Silk Yarns for Electronic Textiles », *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, n° 10, p. 9045-9050, mars 2017, doi: 10.1021/acsami.7b00530.
- [85] S. Afroj, S. Tan, A. M. Abdelkader, K. S. Novoselov, et N. Karim, « Highly Conductive, Scalable, and Machine Washable Graphene-Based E-Textiles for Multifunctional Wearable Electronic Applications », *Adv. Funct. Mater.*, vol. 30, n° 23, p. 2000293, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202000293>.
- [86] G. Kim, C. C. Vu, et J. Kim, « Single-Layer Pressure Textile Sensors with Woven Conductive Yarn Circuit », *Appl. Sci.*, vol. 10, n° 8, Art. n° 8, janv. 2020, doi: 10.3390/app10082877.
- [87] V. Gaubert, H. Gidik, et V. Koncar, « Boxer Underwear Incorporating Textile Moisture Sensor to Prevent Nocturnal Enuresis », *Sensors*, vol. 20, n° 12, Art. n° 12, janv. 2020, doi: 10.3390/s20123546.
- [88] R. Cao *et al.*, « Screen-Printed Washable Electronic Textiles as Self-Powered Touch/Gesture Tribo-Sensors for Intelligent Human–Machine Interaction », *ACS Nano*, vol. 12, n° 6, p. 5190-5196, juin 2018, doi: 10.1021/acsnano.8b02477.
- [89] H. Jin, N. Matsuhisa, S. Lee, M. Abbas, T. Yokota, et T. Someya, « Enhancing the Performance of Stretchable Conductors for E-Textiles by Controlled Ink Permeation », *Adv. Mater.*, vol. 29, n° 21, p. 1605848, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201605848>.
- [90] D. A. Hardy *et al.*, « Wash Testing of Electronic Yarn », *Materials*, vol. 13, n° 5, Art. n° 5, janv. 2020, doi: 10.3390/ma13051228.
- [91] H. Shahariar, I. Kim, R. Bhakta, et J. S. Jur, « Direct-write printing process of conductive paste on fiber bulks for wearable textile heaters », *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, n° 8, p. 085018, juill. 2020, doi: 10.1088/1361-665X/ab8c25.
- [92] B. Hwang, A. Lund, Y. Tian, S. Darabi, et C. Müller, « Machine-Washable Conductive Silk Yarns with a Composite Coating of Ag Nanowires and PEDOT:PSS », *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, n° 24, p. 27537-27544, juin 2020, doi: 10.1021/acsami.0c04316.
- [93] H. J. Salavagione, P. S. Shuttleworth, J. P. Fernández-Blázquez, G. J. Ellis, et M. A. Gómez-Fatou, « Scalable graphene-based nanocomposite coatings for flexible and washable conductive textiles », *Carbon*, vol. 167, p. 495-503, oct. 2020, doi: 10.1016/j.carbon.2020.05.108.
- [94] V. Gaubert, H. Gidik, N. Bodart, et V. Koncar, « Quantification of the silver content of a silver-plated nylon electrode according to the nature of the laundering detergent », *IOP Conf.*

Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 827, n° 1, p. 012033, avr. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/827/1/012033.

[95] R. Sliz *et al.*, « Reliability of R2R-printed, flexible electrodes for e-clothing applications », *Npj Flex. Electron.*, vol. 4, n° 1, Art. n° 1, juill. 2020, doi: 10.1038/s41528-020-0076-y.

[96] S. M. Saleh, S. M. Jusob, F. K. C. Harun, L. Yuliaty, et D. H. B. Wicaksono, « Optimization of Reduced GO-Based Cotton Electrodes for Wearable Electrocardiography », *IEEE Sens. J.*, vol. 20, n° 14, p. 7774-7782, juill. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2981262.

[97] W. Bao, J. Shen, et X. Ding, « The influence of mechanical action on felting shrinkage of wool fabric in the tumble dryer », *Text. Res. J.*, vol. 90, n° 21-22, p. 2367-2375, nov. 2020, doi: 10.1177/0040517520918665.

[98] I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, 2^e éd. New York: Springer-Verlag, 2002.

[99] Y. ZHU, « Contribution à l'évaluation et à la modélisation du bien-être des matériaux textiles habillement par l'utilisation des techniques de calcul avancé », Université de Lille 1 - Sciences et Technologies, villeneuve d'ascq, france, 2010.

[100] Z. Xue, « Study on relations between visual and haptic perceptions of textile products », These de doctorat, Lille 1, 2012.

[101] F. Berthouzoz, A. Garg, D. M. Kaufman, E. Grinspun, et M. Agrawala, « Parsing sewing patterns into 3D garments », *ACM Trans. Graph.*, vol. 32, n° 4, p. 85:1–85:12, juill. 2013, doi: 10.1145/2461912.2461975.

[102] D. Bradley, T. Popa, A. Sheffer, W. Heidrich, et T. Boubekeur, « Markerless garment capture », *ACM Trans. Graph.*, vol. 27, n° 3, p. 1–9, août 2008, doi: 10.1145/1360612.1360698.

[103] X. Chen, B. Zhou, F. Lu, L. Wang, L. Bi, et P. Tan, « Garment modeling with a depth camera », *ACM Trans. Graph.*, vol. 34, n° 6, p. 203:1–203:12, oct. 2015, doi: 10.1145/2816795.2818059.

[104] H. Rödel, A. Schenk, C. Herzberg, et S. Krzywinski, « Links between design, pattern development and fabric behaviours for clothes and technical textiles », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 13, n° 3/4, p. 217-227, janv. 2001, doi: 10.1108/EUM0000000005782.

[105] C. C. L. Wang, Y. Wang, et M. M. F. Yuen, « Feature based 3D garment design through 2D sketches », *Comput.-Aided Des.*, vol. 35, n° 7, p. 659-672, juin 2003, doi: 10.1016/S0010-4485(02)00091-X.

[106] Z. Yasseen, A. Nasri, W. Boukaram, P. Volino, et N. Magnenat-Thalmann, « Sketch-based garment design with quad meshes », *Comput.-Aided Des.*, vol. 45, n° 2, p. 562-567, févr. 2013, doi: 10.1016/j.cad.2012.10.041.

[107] K. Liu, E. Kamalha, J. Wang, et T.-K. Agrawal, « Optimization design of cycling clothes' patterns based on digital clothing pressures », *Fibers Polym.*, vol. 17, n° 9, p. 1522-1529, sept. 2016, doi: 10.1007/s12221-016-6402-2.

[108] M. Zhang, H. Dong, X. Fan, et R. Dan, « Finite element simulation on clothing pressure and body deformation of the top part of men's socks using curve fitting equations », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 27, n° 2, p. 207-220, janv. 2015, doi: 10.1108/IJCST-12-2013-0139.

- [109] K. Liu, J. Wang, C. Zhu, et Y. Hong, « Development of upper cycling clothes using 3D-to-2D flattening technology and evaluation of dynamic wear comfort from the aspect of clothing pressure », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 28, n° 6, p. 736-749, janv. 2016, doi: 10.1108/IJCST-02-2016-0016.
- [110] V. Chattaraman, K. P. Simmons, et P. V. Ulrich, « Age, Body Size, Body Image, and Fit Preferences of Male Consumers », *Cloth. Text. Res. J.*, vol. 31, n° 4, p. 291-305, oct. 2013, doi: 10.1177/0887302X13506111.
- [111] S. P. Ashdown et L. Dunne, « A Study of Automated Custom Fit: Readiness of the Technology for the Apparel Industry », *Cloth. Text. Res. J.*, vol. 24, n° 2, p. 121-136, mars 2006, doi: 10.1177/0887302X0602400206.
- [112] C. Chen, « Fit evaluation within the made-to-measure process », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 19, n° 2, p. 131-144, janv. 2007, doi: 10.1108/09556220710725720.