



**HAL**  
open science

# Étude mécanique et physique de froissement et dé-froissement des textiles cellulosiques à base de coton et lin

Lina Ben Hassine

► **To cite this version:**

Lina Ben Hassine. Étude mécanique et physique de froissement et dé-froissement des textiles cellulosiques à base de coton et lin. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2022. Français. NNT : 2022MULH3181 . tel-03828039

**HAL Id: tel-03828039**

**<https://theses.hal.science/tel-03828039v1>**

Submitted on 25 Oct 2022

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

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

Année 2022

N° d'ordre : (attribué par le SCD)

UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE  
UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

# THESE

Pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE**

**ECOLE DOCTORALE : Mathématiques et Sciences de l'Information et de l'Ingénieur (ED 269)**

Discipline : Mécanique

Présentée et soutenue publiquement

par

**Lina BEN HASSINE**

Le 17 juin 2022

---

## **Étude mécanique et physique de froissement et dé-froissement des textiles cellulosiques à base de coton et lin**

---

Sous la direction de : Abdelaziz LALLAM et de Dimitri IVANOV

Jury : Prof. Boussad ABBES, Université de Reims Champagne Ardennes (Rapporteur)  
Prof. Christine CAMPAGNE, Ensait Université de Lille, Roubaix (Rapporteur)  
Prof. Stéphane FONTAINE, École Supérieures d'Arts et Métiers, Metz (Président)  
DR. Hayriye GIDIK, École des Hautes Études d'Ingénieurs, Lille (Examineur)  
Prof. Lahcène BENCHEIKH, Université de Sétif1-Algérie (Examineur)  
DR. Aziz LALLAM, Université de Haute Alsace (Directeur de thèse)  
Prof. Dimitri IVANOV, Université de Haute Alsace (co-Directeur de thèse)



*Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon père, la mémoire de mon  
frère et ma très chère mère.*



## Remerciements

J'adresse tout d'abord ma sincère gratitude à mon directeur de thèse Abdelaziz LALLAM, pour son encadrement, sa patience, sa compréhension ses encouragements, et la confiance qu'il m'a accordée. Ses remarques et ses conseils avisés m'ont été d'une aide précieuse pour me guider et mener à bien ce projet de recherche. Merci pour tes encouragements et ton soutien je te suis infiniment reconnaissante.

Je tiens à remercier mon co-directeur de thèse Dimitri Ivanov pour sa contribution et son soutien.

Mes reconnaissances s'adressent également au Pr. Lahcène BENCHEIKH, pour son aide, sa générosité et sa bonne-humeur.

Je remercie les membres de jury, Pr. Boussad ABBES, Pr. Christine CAMPAGNE, Pr. Stéphane FONTAINE et Dr. Hayriye GIDIK, d'avoir accepté d'évaluer mes travaux de recherche et assister à ma soutenance de thèse.

Je remercie également tout le personnel du Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT) et plus particulièrement à Christian PIDANCIER pour sa disponibilité et son aide dans la mise en place des dispositifs expérimentaux. Mes remerciements à Philippe BLONDEL pour le temps qu'il m'a consacré pour me former sur les différentes machines. Merci à Estelle KNOPF de m'avoir facilité le volet administratif.

Merci à tous mes collègues et ex-collègues du LPMT Donya, Clément, Charles, Emna, Claire, Sedik, Elise, Floriane, Imen et Wafa pour leur agréable compagnie durant ces années de thèse.

Je ne manquerais pas de remercier mes amis Oussama, Maedeh, Zack, Abdul Rahmane, Imane et Naïma qui étaient toujours là quand j'en avais besoin et d'avoir trouvé les bons mots pour me motiver.

Enfin et surtout, merci à mon père de m'avoir toujours soutenue dans toutes mes décisions, de m'avoir encouragée à poursuivre mes études par une thèse doctorale et vivre cette expérience enrichissante. J'aurais bien aimé que tu sois là parmi nous, cher papa, pour partager avec nous la joie de cet accomplissement. Merci à ma mère de m'avoir transmis sa force et sa volonté pour prendre de l'élan et viser plus haut.

# Sommaire

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1: Bibliographie .....</b>	<b>3</b>
Tables des matières.....	4
Tables des illustrations .....	5
Liste des tableaux .....	7
Introduction .....	8
1. Généralités sur les matières textiles .....	8
1.1 La fibre.....	8
1.2 Le fil.....	9
1.3 L'étoffe textile .....	9
2. Les fibres cellulosiques .....	10
2.1 Fibre de coton .....	12
2.1.1 Structure de la fibre de coton .....	12
2.1.2 Composition de la fibre de coton .....	13
2.2 Fibre de lin .....	14
2.2.1 Structure de la fibre de lin .....	14
2.2.2 Composition de la fibre de lin .....	15
3. La cellulose.....	16
3.1 Structure moléculaire .....	16
3.2 Les groupes hydroxyles dans la cellulose.....	17
3.3 Structure macromoléculaire et cristallinité de la cellulose .....	18
3.4 Stabilité thermique de la cellulose .....	20
4. Interaction de l'eau avec les matériaux textiles à base de cellulose.....	21
4.1 Propriétés physiques et structure moléculaire de l'eau.....	21
4.2 Le phénomène de sorption .....	22
4.3 Isothermes de sorption .....	22
4.4 Etats de l'eau dans les matériaux cellulosiques.....	24
4.5 Effet de l'humidité sur la température de transition vitreuse et sur les propriétés physico-mécaniques et des fibres de lin et de coton.....	26
4.5.1 La température de transition vitreuse .....	26
4.5.2 Les propriétés physico-mécaniques.....	29
5. Mécanisme de froissement des fibres cellulosiques et défroissement par repassage	30
5.1 La froissabilité .....	30

5.1.1	La froissabilité à sec .....	31
5.1.2	La froissabilité au mouillé.....	31
5.2	Repassage ou défroissement hydro-thermique .....	31
5.3	Évaluation optique des surfaces froissées.....	32
5.3.1	Evaluation subjective du froissement.....	32
5.3.2	Evaluation objective du froissement des textiles.....	33
6.	Transfert thermique .....	35
6.1	Le transfert thermique par conduction.....	35
6.2	Le transfert thermique par convection .....	36
6.3	Distribution de chaleur unidimensionnelle dans une paroi plane .....	37
7.	Propriétés mécaniques des matériaux cellulosiques.....	38
7.1	Propriétés mécaniques en statique des fibres de lin et du coton.....	38
7.2	Phénomènes transitoires, viscoélasticité et relaxation des contraintes internes .	40
7.2.1	La relaxation.....	40
7.2.2	Notion de base de la rhéologie .....	42
7.2.3	Modèles analogiques .....	43
7.3	Tribologie des matériaux textiles .....	45
7.3.1	Le frottement sec.....	46
7.3.2	Le frottement humide .....	47
7.3.3	Le phénomène de stick-slip.....	48
	Conclusion de l'étude bibliographique.....	49
	<b>CHAPITRE 2: Matériaux et Méthodes.....</b>	<b>55</b>
	Introduction .....	58
1.	Caractéristiques des tissus .....	58
2.	Méthodes de détermination de la teneur en eau au sein des tissus.....	60
2.1	Séchage des éprouvettes dans l'étuve .....	60
2.2	Analyses de dessiccateur infrarouge.....	61
3.	Caractérisation des propriétés thermiques des fibres cellulosiques .....	61
3.1	Détermination de la température de dégradation par analyse thermique gravimétrique ATG.....	61
3.2	Détermination de la Tg par calorimétrie différentielle à balayage (DSC).....	63
4.	Evaluation objective des surfaces textiles .....	65
4.1	Préparation des échantillons .....	65
4.2	Evaluation objective des surfaces textiles .....	66
4.2.1	Traitement d'image .....	66

4.2.3	Évaluation par balayage 3D .....	68
4.2.3	Evaluation de coefficient de frottement sous l'effet de la chaleur de la semelle du fer .....	69
5.	Étude de relaxation des tissus textiles après repassage .....	70
5.1	Evaluation optique du phénomène de relaxation .....	71
5.2	Essai de relaxation .....	72
6.	Mesure de températures avec la caméra thermique.....	73
	Conclusion.....	74
	<b>CHAPITRE 3: Étude des caractéristiques physico-chimiques des tissus .....</b>	<b>75</b>
1.	Évaluation quantitative de la teneur en eau des tissus à base de fibres cellulosiques .....	78
1.1	Désorptions des tissus à base de fibres cellulosiques .....	79
1.1.1	Mesure de la teneur en eau par séchage en étuve.....	79
1.1.2	Cinétique de perte de masse en eau.....	79
1.2	Adsorption .....	83
2.	Étude de la stabilité thermique de la cellulose .....	86
2.1	Analyse de la dégradation par thermogravimétrie .....	87
2.2	Détermination des températures de transition vitreuse.....	88
3.	Evaluation objective d'état de surface des textiles.....	92
3.1.	Coefficient de frottement contre la semelle du fer à repasser .....	93
3.2.	Evaluation par traitement d'image .....	95
3.3.	Evaluation des surfaces textiles par scan 3D .....	97
	Conclusion.....	99
	<b>CHAPITRE 4: Modélisation de la relaxation des étoffes cellulosiques et du transfert thermique dans le cas de repassage .....</b>	<b>101</b>
	Introduction .....	104
1.	Étude du comportement mécanique en mode relaxation post-repassage des textiles cellulosiques .....	104
1.1	Retrait dimensionnel et relaxation des contraintes résiduelles post-repassage. 104	
1.2	Évaluation de surface par scan 3D.....	106
1.3	Exploitation des résultats expérimentaux et analyse de la relaxation des contraintes résiduelles.....	108
2.	Étude de transfert de chaleur dans le repassage .....	111
2.1	Mesures de la température des surfaces.....	111
2.2	Approche mathématique du transfert de chaleur dans le cas de repassage ..	115
2.3	Exemples d'application de l'approche mathématique.....	119

<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>123</b>
Références .....	124
Annexes .....	130
Résumé .....	137
Abstract.....	137

## Introduction Générale

Le travail de recherche dont les résultats sont présentés dans ce rapport de thèse de doctorat a été réalisé grâce au soutien financier de la compagnie néerlandaise PHILIPS-filiale Singapour. Le but du travail consiste à étudier et à comprendre le phénomène du repassage des vêtements principalement à base de fibres cellulosiques afin d'en améliorer les performances. Le repassage est une pratique ordinaire qui confère au vêtement un aspect d'élégance, de lustre et une sensation apparente de confort. Cette opération a toujours été réalisée de façon empirique quel que soit la nature du tissu à repasser. Le travail effectué dans le cadre de cette thèse a l'ambition d'étudier en détail l'opération du repassage en tenant compte de la nature et de la structure des matériaux qui composent le textile afin de s'affranchir de l'empirisme qui règne dans ce domaine.

Le travail de thèse, composé de quatre chapitres et deux annexes, dont l'une concerne l'analyse d'images et l'autre détaille les calculs du modèle de transfert de chaleur développé dans cette étude. Le travail de recherche consiste à étudier et analyser les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques des matières textiles à base de fibres cellulosiques qui ont tendance à froisser à l'usage et au stockage comparées aux restes des fibres qu'elles soient naturelles, protéiniques, ou synthétiques. L'objectif de ce travail porte sur l'analyse et la compréhension des mécanismes qui régissent les phénomènes de déformation des surfaces textiles sous l'effet de contraintes internes et externes. La compréhension de la structure des fibres et la maîtrise des paramètres responsables des mécanismes de froissement permet l'amélioration de la qualité du repassage des vêtements à base de matières cellulosiques.

Selon la nature de la matière textile, le froissement est dû aux interactions intermoléculaires de type hydrogène et/ou Van der Waals ou encore à la combinaison des deux types d'interactions. Le froissement modéré dû au porté ou au stockage est un phénomène réversible. Les liaisons hydrogène, de faible énergie par rapport au liaisons covalentes et ioniques, ont un caractère polaire et par conséquent elles sont faciles à rompre dans les milieux chauds et aqueux, comme par exemple dans l'opération de repassage de vêtements.

Au-dessus de la température de transition vitreuse et dans des milieux humides, la densité du réseau des liaisons secondaires intermoléculaires responsables du froissement diminue. Le couplage humidité-température est exploité dans la fabrication des centrales de repassage des vêtements.

Les propriétés intrinsèques sont liées principalement à la structure et à la texture des matériaux. Elles concernent les propriétés morphologiques, viscoélastiques, mécaniques et thermiques. Quant aux propriétés extrinsèques ce sont celles conférées aux tissus lors des opérations de transformation et de mise en œuvre du produit final.

Dans une première phase, on procède à une caractérisation morphologique et structurale afin d'établir les corrélations pouvant exister entre la structure et les propriétés du matériau textile. Les caractérisations effectuées concernent la résistance mécanique du matériau à travers l'analyse des courbes contrainte-déformation, la température et le taux d'humidité relative. La

structure morphologique, la température de transition vitreuse et leurs évolutions en fonction des conditions hydrothermiques et mécaniques sont les paramètres clés dans cette l'étude.

Le plan du travail de recherche peut être résumé comme suit :

Première étape :

- Caractérisation complète de la structure et de la texture des matériaux textiles concernés par l'étude.
- Faire une synthèse sur l'état des connaissances dans le domaine de la pratique du repassage domestique et les corrélés aux caractéristiques spécifiques des textiles.
- Caractérisation de la surface des échantillons textiles via les mesures de rugosité de surface, du coefficient de frottement et à l'analyse d'image des surfaces.
- Mesures des propriétés viscoélastiques, notamment le suivi de la relaxation des contraintes mécaniques des matières textiles en fonction de la température et de l'humidité. Les résultats de ces expérimentations conduisent à la suggestion de modèle mécanique analogique permettant de simuler le comportement viscoélastique du matériau en mode relaxation.
- Étude du transfert chaleur entre la semelle de fer à repasser et le textile. En s'appuyant sur les résultats expérimentaux obtenus, on a proposé un modèle mathématique pour simuler le profil de température de part et d'autre de la surface et à travers l'épaisseur du tissu lors du repassage.

Deuxième étape :

- Évaluation de la qualité du repassage par une méthode classique consistant à mesurer le coefficient de frottement du fer repasser sur l'étoffe et par la mesure de la rugosité de surface dans les conditions standards de repassage.

Enfin, dans la troisième étape :

- Évaluation de la qualité du repassage par la méthode optique, analyse d'image.
- Scanner les surfaces avant et après le repassage et analyser la différence de topographie en utilisant un logiciel d'analyse d'image approprié.
- Comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus par un panel d'évaluateurs humains.

# **CHAPITRE 1**

## **Bibliographie**



## Tables des matières

Introduction .....	8
1. Généralités sur les matières textiles .....	8
1.1 La fibre.....	8
1.2 Le fil.....	9
1.3 L'étoffe textile .....	9
2. Les fibres cellulosiques .....	10
2.1 Fibre de coton .....	12
2.1.1 Structure de la fibre de coton .....	12
2.1.2 Composition de la fibre de coton .....	13
2.2 Fibre de lin .....	14
2.2.1 Structure de la fibre de lin .....	14
2.2.2 Composition de la fibre de lin .....	15
3. La cellulose.....	16
3.1 Structure moléculaire .....	16
3.2 Les groupes hydroxyles dans la cellulose .....	17
3.3 Structure macromoléculaire et cristallinité de la cellulose .....	18
3.4 Stabilité thermique de la cellulose .....	20
4. Interaction de l'eau avec les matériaux textiles à base de cellulose.....	21
4.1 Propriétés physiques et structure moléculaire de l'eau.....	21
4.2 Le phénomène de sorption .....	22
4.3 Isothermes de sorption .....	22
4.4 Etats de l'eau dans les matériaux cellulosiques .....	24
4.5 Effet de l'humidité sur la température de transition vitreuse et sur les propriétés physico-mécaniques et des fibres de lin et de coton.....	26
4.5.1 La température de transition vitreuse .....	26
4.5.2 Les propriétés physico-mécaniques.....	29
5. Mécanisme de froissement des fibres cellulosiques et défroissement par repassage	30
5.1 La froissabilité .....	30
5.1.1 La froissabilité à sec .....	31
5.1.2 La froissabilité au mouillé.....	31
5.2 Repassage ou défroissement hydro-thermique .....	31
5.3 Évaluation optique des surfaces froissées.....	32
5.3.1 Evaluation subjective du froissement.....	32

5.3.2	Evaluation objective du froissement des textiles.....	33
6.	Transfert thermique .....	35
6.1	Le transfert thermique par conduction.....	35
6.2	Le transfert thermique par convection .....	36
6.3	Distribution de chaleur unidimensionnelle dans une paroi plane.....	37
7.	Propriétés mécaniques des matériaux cellulosiques.....	38
7.1	Propriétés mécaniques en statique des fibres de lin et du coton.....	38
7.2	Phénomènes transitoires, viscoélasticité et relaxation des contraintes internes .	40
7.2.1	La relaxation.....	40
7.2.2	Notion de base de la rhéologie .....	42
7.2.3	Modèles analogiques .....	43
7.3	Tribologie des matériaux textiles .....	45
7.3.1	Le frottement sec.....	46
7.3.2	Le frottement humide.....	47
7.3.3	Le phénomène de stick-slip.....	48
	Conclusion de l'étude bibliographique.....	49

## Tables des illustrations

<b>Figure 1. 1</b>	Fil simple obtenu par torsion des fibres (MEB) [3].....	9
<b>Figure 1. 2</b>	a) Tissu. b) Tricot. c) Non-tissé formé par liage thermique. d) non-tissé formé par enchevêtrement hydraulique [4].....	10
<b>Figure 1. 3</b>	La production mondiale de fibres en % (Bremer Baumwollbörse, 2019) [7].....	11
Figure 1. 4	Image au microscope électronique des fibres de coton : (a) fibres longitudinales. (b) coupe transversale des fibres de coton. [9] .....	12
<b>Figure 1. 5</b>	La structure de fibre de coton [10].....	13
<b>Figure 1. 6</b>	Structure de fibre de lin avec une image au microscope électronique d'une coupe transversale [16]. .....	14
<b>Figure 1. 7</b>	Représentation schématique d'une chaîne de cellulose [21]. .....	16
<b>Figure 1. 8</b>	Représentation de la structure cristalline des allomorphes I $\alpha$ (A) et I $\beta$ (B) (Navi and Heger, 2005). .....	17
<b>Figure 1. 9</b>	Assemblage de molécules de cellulose dans une feuille. Les liaisons hydrogène sont représentées par des lignes pointillées. Les atomes de carbone entourés; C2, C3 et C6, montrent l'emplacement des groupes hydroxyles (-OH) [31]. .....	18
<b>Figure 1. 10</b>	Schéma de la structure d'une fibrille de cellulose [32].....	18
<b>Figure 1. 11</b>	Diffractogramme des rayons X des fibres de lin (courbe 1) et des fibres de coton (courbe 2).[34].....	19
<b>Figure 1. 12</b>	Détermination de la cristallinité à partir de l'intensité XRD intégrale des fractions cristallines et amorphes de (a, b) lin et (c, d) fibres de coton, (b, d) 10 profils après soustraction de la contribution de la partie amorphe. [34] .....	20

<b>Figure 1. 13</b> Courbes TGA (a) et DTA (b) de poudre de cellulose (vitesse de 10°C/min) [37]. .....	21
<b>Figure 1. 14</b> Diagramme de la molécule d'eau, Les deux liaisons intramoléculaires hydrogène – oxygène forment un angle de 105 °, Les charges partielles opposées ( $\delta^-$ et $\delta^+$ ) sur la molécule d'eau conduisent à la formation de liaisons hydrogène intermoléculaires. ....	22
<b>Figure 1. 15</b> L'isotherme d'adsorption et l'isotherme de désorption [43]. ....	23
<b>Figure 1. 16</b> Allure d'une isotherme de sorption.....	23
<b>Figure 1. 17</b> Représentation schématique de l'absorption d'eau: (1) surface externe de la fibre, (2) région amorphe, (3) surface interne des vides, (4) cristallites [Okubayashi et al., 2004]. .	25
<b>Figure 1. 18</b> Représentation schématique des liaisons hydrogène intramoléculaires et intermoléculaires des chaînes de cellulose (Navi & Heger, 2005) [53]. ....	25
<b>Figure 1. 19</b> La Tg de la cellulose en fonction de teneur en eau : les points expérimentaux DSC pour 5,3, 7, 15 et 20 % d'eau (triangles), la ligne expérimentale de Batzer et Kreibich (ligne segmentée), l'approche de Kaelbe par Salmén et Back pour 0, 55, et 80% de l'indice de cristallinité (lignes pointillées), prédictions de Kaelbe pour IC de 70% (ligne continue) [56]. .....	27
<b>Figure 1. 20</b> a) Le pic de tan delta et (b) le module de conservation d'Young E' en fonction de la température (Sensibilité de mesures pour les échantillons de faible contenu en eau où on ne voit pas les deux transitions) [59]. ....	28
<b>Figure 1. 21</b> La Tg en fonction de la teneur en eau exprimée sur une base humide pour le modèle Couchman-Karasz. Les données sont présentées pour les deux échantillons d'eucalyptus et de cellulose broyée en boule de résineux [52]. ....	29
<b>Figure 1. 22</b> Froissement et résistance au froissement : (a) Représentation schématique de la structure avec des liaisons intermoléculaires. (b) Formation de nouvelles liaisons transversales donnant un pli. (c) Tensions intermoléculaires menant à un pli [68]. ....	31
<b>Figure 1. 23</b> La méthode AATCC d'évaluation de froissement, (a): Les répliques de référence (b) Equipement et matériel d'éclairage pour la visualisation des éprouvettes [71]. ....	33
<b>Figure 1. 24</b> Transfert de chaleur unidimensionnel par conduction (diffusion de l'énergie)..	36
<b>Figure 1. 25</b> Transfert de chaleur à travers une paroi plane. ....	37
<b>Figure 1. 26</b> Résistance à la traction du coton dans le sens de la chaîne et de la trame à différentes valeurs d'humidité relative [81]. ....	39
<b>Figure 1. 27</b> Résistance à la traction d'une toile en lin dans le sens de la chaîne et de la trame à différentes valeurs d'humidité relative Les deux directions de tissage chaîne et remplissage (trame) ont été tendues et les forces enregistrées en cycles RH répétés [82]. ....	39
<b>Figure 1. 28</b> Propriétés de récupération élastique des fibres textiles [83]. ....	40
<b>Figure 1. 29</b> a) Contrainte appliquée avec une déformation constante b) contrainte induite en fonction du temps pour un matériau viscoélastique. ....	41
<b>Figure 1. 30</b> Courbes de relaxation de contrainte du coton à différentes taux de déformation	41
<b>Figure 1. 31</b> Représentation rhéologique d'un solide élastique. ....	42
<b>Figure 1. 32</b> Représentation rhéologique d'un liquide newtonien. ....	43
<b>Figure 1. 33</b> (a) modèle rhéologique de Maxwell (b) Modèle rhéologique de Kelvin-Voight.....	43
<b>Figure 1. 34</b> Réponses en fluage et en relaxation du modèle de Maxwell .....	44
<b>Figure 1. 35</b> Modèle de Maxwell généralisé .....	45
<b>Figure 1. 36</b> (a) Bilan des forces de deux surfaces en contact en état statique ; (b) Bilan des forces de deux surfaces en contact en état dynamique. ....	46
<b>Figure 1. 37</b> Trace de force de frottement en fonction de la force motrice. ....	46

---

**Figure 1. 38** Effet de l'humidité relative sur le frottement du fil de rayonne Frictionmètre Rothschild (RMS-60, tige chromée de diamètre 0,5 po, angle de contact 360) [89]. ..... 47

**Figure 1. 39** Trace de frottement hypothétique pour un matériau textile [83]. ..... 48

## Liste des tableaux

**Tableau 1.** Les classes des fibres avec quelques exemples ..... 9

**Tableau 2.** Composition massique de quelques fibres naturelles cellulosiques [5-6]..... 11

**Tableau 3.** La composition massique en pourcentage de la fibre de coton [11-12]..... 13

**Tableau 4.** La composition biochimique des fibres de lin [13]..... 15

**Tableau 5.** Propriétés thermique de la cellulose..... 21

**Tableau 6.** Résistance et allongement à la rupture des fibres humides rapportés aux mesures des fibres sèches [64] ..... 30

**Tableau 7.** Quelques propriétés mécaniques des fibres de lin et du coton [77-78-79-80]. ..... 38

## Introduction

Le travail de recherche que nous avons mené dans cette thèse revêt un caractère multidisciplinaire. Il fait appel à des connaissances approfondies de physique de mécanique, de thermique et d'optique appliquées aux matériaux textiles à base de polymères naturels dont la composition principale est la cellulose.

Grâce à une bibliographie spécifique, il nous a été possible de construire et d'orienter le travail expérimental mené dans ce chapitre.

Dans un premier temps, nous allons présenter quelques généralités sur les matières textiles et les différentes propriétés des fibres cellulosiques en particulier le lin et le coton aussi la cellulose sous différentes échelles structurales pour assimiler les différents comportements que peut engendrer un matériau à base de cellulose et son interaction avec l'humidité.

Ensuite, nous expliquerons le phénomène de froissement et de défroissement des étoffes textiles, leurs types, leur origine et mécanisme ainsi les méthodes d'évaluation visuelles et optiques de ce genre de déformation des surfaces textiles.

Plus tard nous allons nous pencher sur le transfert thermique et la distribution de chaleur unidimensionnelle dans une paroi plane afin de pouvoir assimiler la diffusion de chaleur dans une étoffe dans le cas de repassage.

En fin, ce chapitre s'achèvera sur un aperçu sur l'aspect mécanique des matériaux textiles notamment le phénomène de relaxation, appelé aussi phénomène d'auto-froissement, étant la cause principale de la réapparition de quelques froissements sur l'étoffe après repassage.

Nous terminerons cette étude bibliographique par une conclusion récapitulative de différentes notions qui ont été exposées.

### 1. Généralités sur les matières textiles

Les matériaux textiles sont des produits élaborés à partir des fibres naturelles ou synthétiques. La fibre textile est une entité élémentaire qui sert à l'élaboration d'un fil que l'on utilisera pour fabriquer une étoffe. La fibre ainsi que le fil sont des textiles linéaires alors que l'étoffe est considérée comme un textile surfacique tissée selon une armure bien définie, tricoté ou un non-tissé.

#### 1.1 La fibre

La fibre textile est caractérisée par une finesse, une forme très allongée par rapport à son diamètre moyen et une ténacité et flexibilité spécifique. Les fibres peuvent être produites d'une façon naturelle ou industrielle et sont classées en trois catégories [1, 2] :

- les fibres naturelles d'origine animale ou végétale ;
- les fibres chimiques artificielles (issues de la cellulose du bois) ;
- les fibres chimiques matières synthétiques qui sont issues de la chimie du pétrole.

Le tableau 1 présente une classification des textiles les plus usuelles selon leur origine.

**Tableau 1.** Les classes des fibres avec quelques exemples

<b>Fibre naturelle</b>	<b>Végétale</b> : coton, lin, chanvre, jute,...
	<b>Animale</b> : laine, soie, mohair, cachemire,...
	<b>Minérale</b> : amiante, wollastonite, sépiolite, ...
<b>Fibre chimique</b>	<b>Artificielle</b> : Verre, acétate, viscosse, ...
	<b>Synthétique</b> : Polyester, polyamide, acrylique, ...

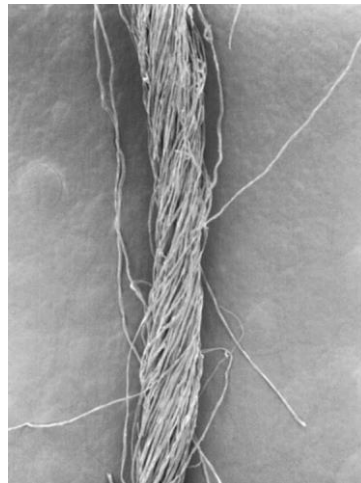
Ces fibres sont caractérisées par plusieurs propriétés : longueur, forme et ténacité, ce sont les propriétés classiques. S'ajoute à cela les propriétés techniques telles que la morphologie, l'élasticité et la résilience. On trouve aussi les propriétés pratiques : inflammabilité, absorption de l'humidité et résistance à l'abrasion. Ces propriétés ne sont pas exhaustives et ne représentent qu'un aperçu de l'éventail des propriétés des fibres textiles qu'elles soient destinées à l'habillement ou des usages techniques.

## 1.2 Le fil

Le fil textile est un assemblage ou enfilé des fibres obtenues par la filature. Il existe plusieurs méthodes industrielles. Les plus usuelles sont : la filature conventionnelle (à anneau curseur), la filature Open End, la filature à jet d'air et la filature à friction.

De plus, la filature conventionnelle occupe le premier rang en termes de production, suivie de la filature Open – end.

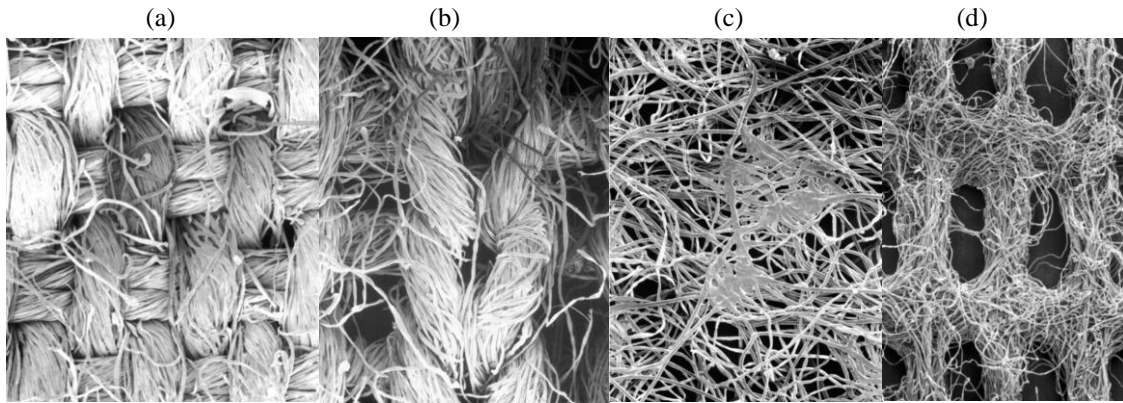
Les fils aussi sont caractérisés par plusieurs paramètres comme le titre ou numéro métrique de fil, la torsion, et la ténacité, etc.



**Figure 1. 1** Fil simple obtenu par torsion des fibres (MEB) [3].

## 1.3 L'étoffe textile

Une étoffe est une surface souple bidimensionnelle obtenue à partir d'un ou de plusieurs fils entrelacés ou des fibres assemblées selon différents processus : entrecroisement (tissus), entre-bouclages (tricotés), enchevêtrement (non-tissés). Les différentes formes d'étoffes textiles sont représentées sur la figure 1. 2.



**Figure 1. 2** a) Tissu. b) Tricot. c) Non-tissé formé par liage thermique. d) non-tissé formé par enchevêtrement hydraulique [4].

Ces étoffes, notamment les tissés et les tricots, peuvent présenter plusieurs formes de froissement et des plis. Cet effet est indésirable surtout pour celles destinées à l'habillement. Cette tendance au froissement dépendra de la nature des matériaux utilisés de la texture des étoffes, de l'épaisseur, la rigidité etc. À titre d'exemple, les étoffes à base de fibres cellulosiques comme le coton et le lin, ont une haute tendance à se froisser fortement d'où une déformation de surface. Ainsi, il est très important d'étudier les propriétés de ces fibres naturelles pour mieux comprendre le comportement des étoffes obtenues par ces fibres.

## 2. Les fibres cellulosiques

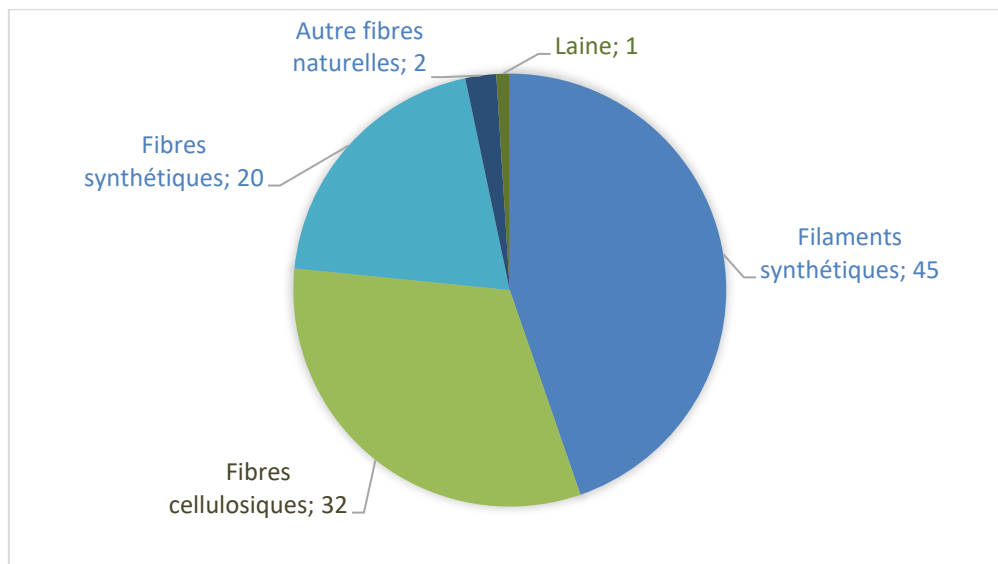
Le terme de fibres cellulosiques indique que ces fibres sont composées majoritairement de cellulose qui est une substance organique constituant la membrane des végétaux. Cette classe de fibres constitue une grande gamme des produits naturels de type végétal dont les plus connus et les plus importants sont le coton et le lin. D'autres fibres naturelles telles que les fibres de chanvre sont étudiées actuellement en raison de leur potentiel d'application qui s'étend à beaucoup de domaines. On peut également trouver d'autres fibres cellulosiques obtenues par modification chimique comme la viscose par exemple.

Le tableau 2 présente les différentes fibres cellulosiques végétales avec leurs différentes compositions organiques. Les intervalles des valeurs de compositions chimiques sont expliqués par le fait qu'on trouve plusieurs variétés pour chaque fibre qui dépendent du climat, de l'origine et variété de fibre, maturité de fibre, etc.

**Tableau 2.** Composition massique de quelques fibres naturelles cellulosiques [5-6].

Type de fibre	Cellulose (%)	Lignine(%)	Hémicellulose (%)	Pectine (%)	Cendre (%)	
<b>Fibre libérienne</b>	Lin	71	2.2	18.6 – 22.6	2.3	–
	Lin oléagineux	3–47	21–23	24–2 <sup>6</sup>	–	5
	Kénaf	31–57	15–19	21.5–23	–	2–5
	Jute	45–71.5	12–26	13.6–21	0.2	0.5–2
	Chanvre	57–77	3.7–13	14–22.4	0.9	0.8
	Ramie	68.6–91	0.6–0.7	5–16.7	1.9	–
<b>Fibre d'âme</b>	Kenaf	37–49	15–21	18–24	–	2–4
	Jute	41–48	21–24	18–22	–	0.8
<b>Fibre de feuille</b>	Abaca	56–63	7–9	15–17	–	3
	Sisal	47–78	7–11	10–24	10	0.6–1
	Henequen	77.6	13.1	4–8	–	–
<b>Fibre de grain</b>	Coton	80 – 94	1,1 – 2	3,5 – 5,7	0,6 – 1,1	0,6 – 1,5

Malgré la domination des matières textiles synthétiques, figure 1. 3, (environ 65% de la production mondiale), la demande de fibres textiles à base de cellulose ne cesse de croître pour trois raisons : une exigence plus prononcée concernant la qualité des vêtements (le toucher et les propriétés hygroscopiques et hygiéniques), la nécessité de répondre aux besoins d'une démographie croissante. De plus, ces fibres sont aptes aux recyclages ce qui élargie encore plus la part de cette classe de fibres dans l'application textile.

**Figure 1. 3** La production mondiale de fibres en % (Bremer Baumwollbörse, 2019) [7].

Notre travail de thèse portera sur deux types de fibres ; le coton et le lin dont on présentera les différentes propriétés et caractéristiques dans la partie suivante.



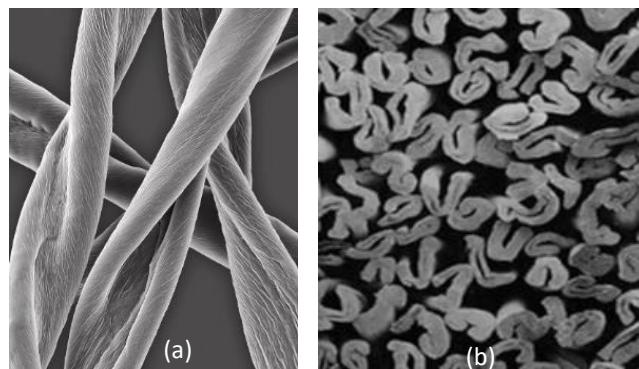
## 2.1 Fibre de coton

Le coton est une fibre naturelle très ancienne. Des traces datant d'il y a plus de 3000 ans avant JC en ont ainsi été retrouvées en Inde et en Amérique du sud (Mexique), utilisée surtout dans le domaine d'habillement. Le coton provient des fibres qui entourent la graine du cotonnier d'espèce « *Gossypium* » de la famille des malvacées. Parmi les espèces de cotonnier existants, environ 1500 espèces, seuls quatre espèces sont filables en raison de longueur.

A lui seul, le coton représente 23,6 % de la production mondiale de fibres textiles [8] et l'écrasante majorité de celle de fibres d'origine naturelle. La production mondiale de coton a augmenté de 10 % en 2017/2018 pour atteindre 23,5 millions de tonnes selon le Comité consultatif international sur le coton (ICAC). Quant au lin, il ne représente que 0,3 % de la production mondiale de fibres textiles [7]. Cependant, en 2018, 70% des volumes mondiaux de lin fibres sont produits en France soit près de 100 000 tonnes [8].

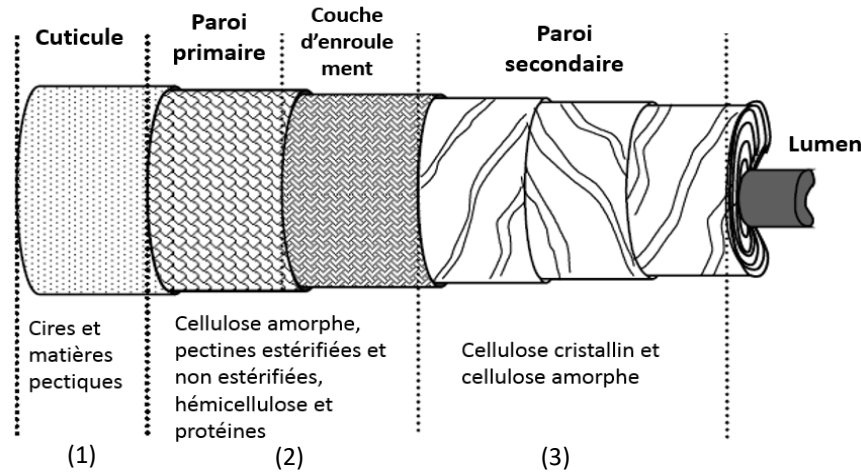
### 2.1.1 Structure de la fibre de coton

Le coton est une fibre monocellulaire, dont les cellules épidermiques s'étendent de la graine du cotonnier. Le cotonnier éclate à maturité, révélant une touffe de fibres de 25 à 60 mm de longueur et de diamètres variant entre 12 et 45  $\mu\text{m}$ . La section transversale des fibres est en forme de haricot comme illustrée sur la figure 1. 4 ; cependant, en gonflant, elle est presque ronde lorsque l'absorption d'humidité a lieu.



**Figure 1. 4** Image au microscope électronique des fibres de coton : (a) fibres longitudinales. (b) coupe transversale des fibres de coton. [9]

Les fibres de coton ont une structure à trois parois prononcées présentée sur figure 1. 5. La couche de cuticule se compose de matériaux de cire et de pectine. Cette couche de cire externe protège la paroi principale, qui elle-même entoure la paroi secondaire. Cette dernière se compose de trois couches distinctes, qui comprennent des fibrilles parallèles étroitement tassées avec un enroulement en spirale de 25 à 30° [10] et représentent la majorité de la cellulose à l'intérieur des fibres. Le lumen est entouré par le mur tertiaire.



**Figure 1. 5** La structure de fibre de coton [10].

### 2.1.2 Composition de la fibre de coton

Le tableau 3 montre une variation dans les composants mineurs de la fibre de coton. La partie non fibreuse, dans la fibre brute se trouve localisée dans la couche externe (1) sur figure 5. Elle contient les cires, les pectines et d'autres constituants en faibles proportions. Cette couche doit être éliminée dans la fibre finale par des traitements d'ennoblissement notamment le débouillissage permettant ainsi d'augmenter le taux d'hygroscopicité des fibres.

**Tableau 3.** La composition massique en pourcentage de la fibre de coton [11-12]

Source	Church & Miller 1922	Wanamakers Cleveland A.C.S. Cellulose DIV.		Nickerson 1940	Trotman & Pentecost 1910	Matthews 5 <sup>ème</sup> édition 1947	M. Proto & al. 2000
		Brut	Délavé				
<b>Cellulose</b>	91,0	89,3 – 90,5	99,5 – 99,6	80 – 85	99,1 – 99,5	94	88 - 96
<b>Eau</b>	8,0	Sec	Sec	6 – 8	Sec	Sec	Sec
<b>Cires</b>	0,35	4,0 – 4,1	----	0,4 – 1,0	0,01 – 0,15	0,07 - 0,12	0,4 – 1,0
<b>Protéines</b>	0,53	----	----	1,2 – 2,5	0,63 – 3,2	1,3	1,1 – 1,9
<b>Pectines</b>	----	----	----	0,4 – 1,1	----	1,2	0,7 – 1,2
<b>Cendres</b>	0,12	1,0 – 1,1	0,09	0,8 – 1,8	0,05 – 0,75	1,2	0,7 – 1,6
<b>Matières cuticuleuses</b>	----	0,69 – 0,72	----	----	----	----	----
<b>Autres résidus</b>	----	----	----	----	----	1,4	1,4

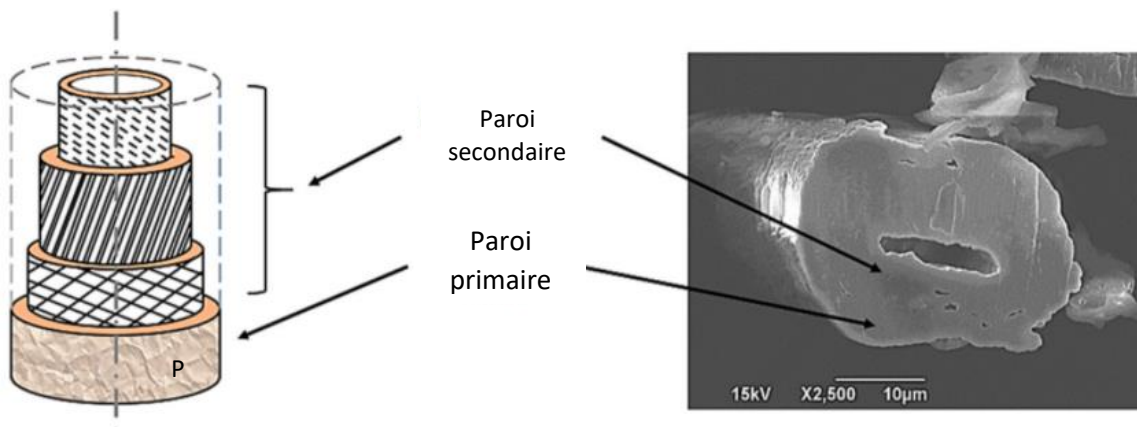
## 2.2 Fibre de lin

Historiquement, les plus anciennes fibres au monde sont des fibres de lin torsadées et teintées, trouvées dans la grotte de Dzudzuana en Géorgie remontant à 36 000 ans [13]. Les populations Mésolithiques de cette époque ont réalisé l'importance du lin sauvage, probablement le *Linum bienne* Mill, pour obtenir des fibres textiles.

Comme le coton, la fibre de lin est de provenance végétale et plus précisément de la plante de lin cultivée (*Linum usitatissimum*). Contrairement au lin sauvage dont la variabilité naturelle présente une grande dispersion, le lin de culture présente des propriétés plus régulières et homogènes. *Linum usitatissimum* est une espèce de plantes dicotylédones de la famille des Linaceae. C'est une plante herbacée à tiges fibreuses se ramifiant en forme de corymbe, largement cultivée pour ses fibres textiles et ses graines oléagineuses. Les fibres représentent tout de même environ 25 % du poids de la tige. Elles sont obtenues par teillage. Cette opération consiste à séparer mécaniquement les fibres des parties ligneuses de la plante. Sa culture est très répandue en Europe environ 80% [14] de la production mondiale notamment en France dont elle présente 75% de la production mondiale en lin. Toutefois, les fibres de lin représentent moins de 1% de l'ensemble des fibres produites dans le monde [7].

### 2.2.1 Structure de la fibre de lin

Les fibres sont des cellules situées dans la tige. Elles forment des faisceaux, disposés en un arrangement circulaire autour du bois. Dans la direction longitudinale, les fibres sont collées les unes aux autres, de telle sorte que les faisceaux fibreux présentent une longueur sensiblement égale à celle de la tige. Dans la section complète de la tige, on compte 20 à 40 faisceaux composés chacun de 20 à 40 fibres. La longueur des fibres varie entre 10 et 100 mm et leur diamètre varie de 40 à 80  $\mu\text{m}$  [15].



**Figure 1. 6** Structure de fibre de lin avec une image au microscope électronique d'une coupe transversale [16].

À maturité, les fibres ont une structure tubulaire et les cellules fibreuses sont complètement entourées des différentes couches formant les parois. Comme montrée dans la figure 1. 6, de l'extérieur vers l'intérieur on distingue deux parois principales : la paroi primaire P, très poreuse, contenant à la fois des pectines et aussi quelque micro-fibrilles de cellulose orientées

aléatoirement d'épaisseur voisine 0,2  $\mu\text{m}$  [17], puis les trois couches S1 à S3 de parois secondaires. La couche intermédiaire de la paroi secondaire S2 est plus épaisse que la première et la troisième couche et contribue à la résistance mécanique de la fibre. La paroi secondaire comprend trois couches constituées de chaînes de cellulose hautement cristallines enroulées en hélice appelées microfibrilles. Ces microfibrilles sont constituées de 30 à 100 chaînes de molécules de cellulose orientées avec un angle d'environ  $10^\circ$  par rapport à l'axe de la fibre. Un angle microfibrillaire plus petit donnera une fibre plus rigide [16]. Selon Bledzki et al, [17], la paroi secondaire contribue jusqu'à 70% au module de Young de la fibre, donc une teneur en cellulose plus élevée entraînera une ténacité plus élevée [17].

### 2.2.2 Composition de la fibre de lin

La composition biochimique des fibres de lin, détaillée sur le tableau 4, varie selon les différents auteurs et dépend notamment de la variété considérée, des conditions climatiques durant sa croissance et encore de la qualité du sol où a été cultivée la plante.

**Tableau 4.** La composition biochimique des fibres de lin [13]

Références	Batra 1998	Lilholt 1999	Kahlil 2000	Troger 1998	Dittenger 2012
<b>Cellulose (%)</b>	64,1	67	73,8	65	62-72
<b>Hémicelluloses (%)</b>	16,7	11	13,7	-	18
<b>Pectine (%)</b>	1,8	-	-	-	-
<b>Lignines (%)</b>	2,0	2	2,9	2,5	-
<b>Cires (%)</b>	1,5	-	-	-	-
<b>Eau (%)</b>	10,0	-	7,9	-	-

D'après le tableau 4, on peut voir que la fibre de lin est composée majoritairement de cellulose. On trouve, en deuxième position dans la composition biochimique des fibres de lin, les hémicelluloses qui sont des polysaccharides complexes de faible poids moléculaire. Elles jouent un rôle fondamental dans le maintien d'une architecture pariétale organisée, liant les fibrilles de cellulose entre elles. Elles sont solubles dans l'eau et peuvent être extraites de la paroi des cellules végétales par des solutions alcalines. Elles ont un degré de polymérisation 100 fois plus petit que celui de la cellulose native et une structure en forme d'hélice qui leur confère une certaine souplesse.

Tout comme les fibres de coton, lors de l'étape de prétraitement d'ennoblissement, les fibres de lin vont perdre les éléments présents dans la couche externe de fibre.

En conclusion, il apparaît que les fibres cellulosiques naturelles présentent une composition chimique variée et une organisation structurale complexe, ceci n'est pas sans conséquences sur l'ensemble des propriétés fonctionnelles. Nous exposerons dans la suite de ce travail, quelques propriétés physiques et mécaniques de fibres de lin et de coton en se focalisant tout d'abord sur le composant majoritaire de ces fibres : la cellulose.

### 3. La cellulose

#### 3.1 Structure moléculaire

La cellulose est un polymère naturel et d'origine végétale seulement. C'est la substance organique la plus abondante dans la nature. Elle est le composant majoritaire et la substance de soutien des fibres végétales. Il y a quatre principales formes allomorphes de celluloses : les celluloses I, II, III et IV [18].

La cellulose, présente dans les parois de cellules végétales, est de la cellulose native « Cellulose I ». C'est aussi un polysaccharide formé de chaînes linéaires de glucose, unies par des liaisons glycosidiques  $\beta$ -(1-4). Les monomères composant ce polymère sont appelés cellobioses, chaque monomère est inversé par rapport au monomère suivant ce qui donne une structure linéaire et fibreuse. Le nombre de répétition de cette unité est n nombre de fois définissant le degré de polymérisation DP. La formule chimique brute de la cellulose est  $(C_6H_{10}O_5)_n$  présentée sur la figure 1. 7.

La chaîne de cellulose contient deux extrémités :

- une extrémité réductrice, c'est celle dont le carbone anomérique n'est pas lié à une autre unité,
- une extrémité non réductrice, c'est celle dont le carbone anomérique est engagé dans une liaison glucidique.

Le coton brut a un DP d'environ 13000 [19], tandis que la cellulose de bois brut a un DP d'environ 10000 [20]. Après un traitement chimique tel que la mise en pâte et le blanchiment, le DP peut diminuer entre 500 et 2600.

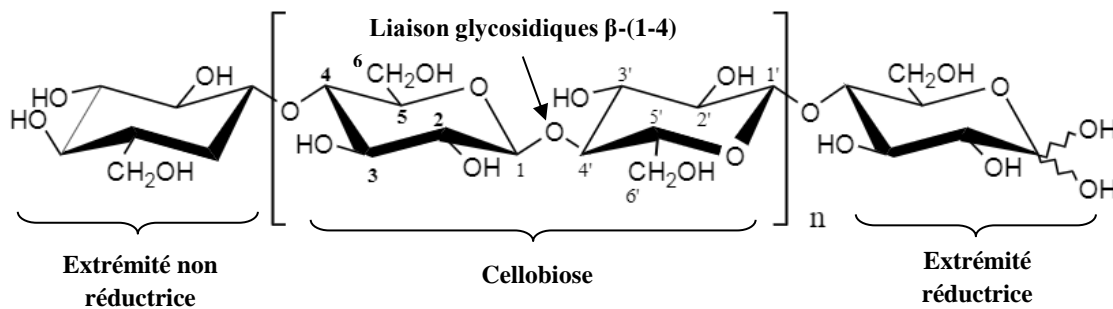
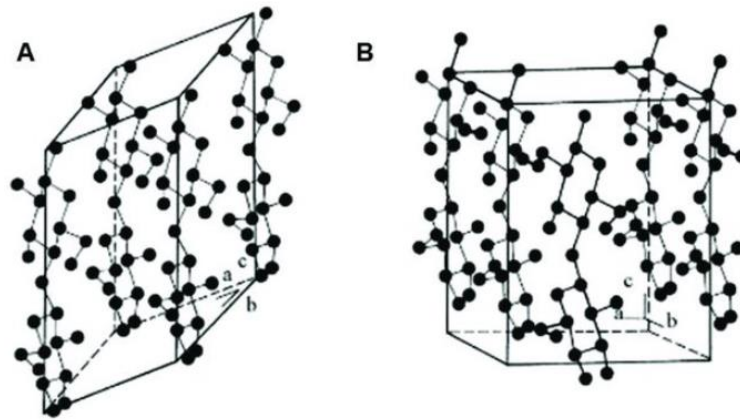


Figure 1. 7 Représentation schématique d'une chaîne de cellulose [21].

La cellulose native « Cellulose I » consiste en un mélange des formes cristallines  $I\alpha$  et  $I\beta$  : la première correspondant à une unité triclinique à une chaîne, tandis que la seconde adopte une cellule monoclinique à deux chaînes, dont l'illustration est sur la figure 1. 8. La structure fine et le système de liaison à l'hydrogène dans la cellulose  $I\alpha$  et  $I\beta$  ont été résolus à partir de la diffraction des rayons X et des fibres neutroniques du synchrotron. La cellulose  $I\alpha$ , majoritaire dans la cellulose produite par les bactéries et les algues, se compose d'une phase triclinique à chaîne unique. Alors que la cellulose  $I\beta$ , plus commune dans la cellulose végétale comme le lin

ou le coton [22], est composée d'une phase monoclinique à deux chaînes parallèles, dont la densité de mailles est de 1,599 g/cm<sup>3</sup>, [23 - 24].

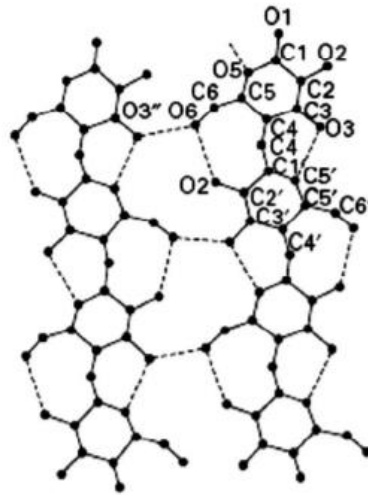


**Figure 1. 8** Représentation de la structure cristalline des allomorphes Ia (A) et Ib (B) (Navi and Heger, 2005).

### 3.2 Les groupes hydroxyles dans la cellulose

Bien qu'insoluble dans l'eau, la cellulose a un caractère hydrophile et peut fixer de nombreuses molécules d'eau grâce aux groupes hydroxyles. Une étude d'identification des groupes hydroxyles a été établie en 1913 [25], en réagissant à la cellulose avec l'hydroxyde de sodium NaOH 15% et de sulfate de diméthyle, un dérivé du triméthyle a été créé, et son hydrolyse acide supplémentaire [26] a prouvé l'existence de deux groupes hydroxyles secondaires et d'un groupe hydroxyle primaire dans chaque résidu de C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub> dans les positions 2, 3 et 6 (illustration sur figure 1. 9). Les trois groupes hydroxyles dans la cellulose diffèrent également dans leurs réactivités [27 - 28]. L'hydroxyle à C<sub>2</sub> est légèrement plus réactif que celui à C<sub>6</sub> et quatre fois plus que celui à C<sub>3</sub> [29].

La présence de groupes hydroxyles et d'atomes d'oxygène sur le cycle pyranose et sur la liaison glycosidique fait en sorte que la cellulose forme un système organisé de liaison à l'hydrogène qui mène à des structures semi-cristallines [30].

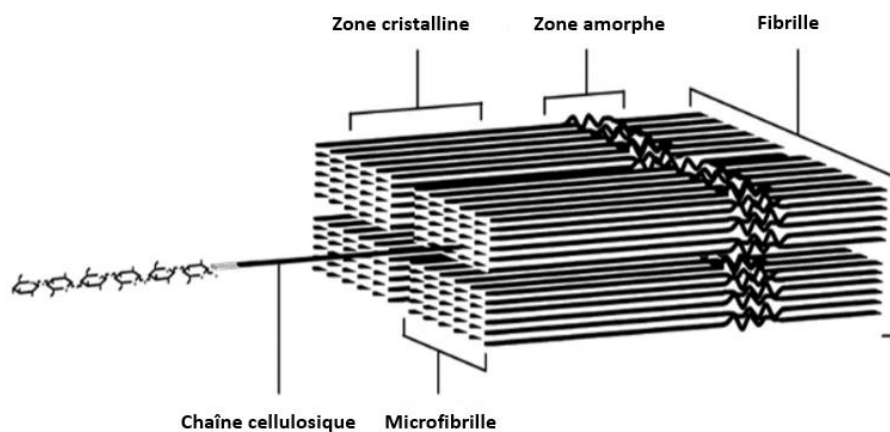


**Figure 1. 9** Assemblage de molécules de cellulose dans une feuille. Les liaisons hydrogène sont représentées par des lignes pointillées. Les atomes de carbone entourés ; C2, C3 et C6, montrent l'emplacement des groupes hydroxyles (-OH) [31].

### 3.3 Structure macromoléculaire et cristallinité de la cellulose

La cellulose est un polymère semi-cristallin. Elle présente deux formes différentes dans son arrangement de polymère : les régions cristallines et les régions amorphes. Dans les zones cristallines, les chaînes de polymères sont disposées de manière parallèle et à proximité les unes des autres. En revanche, dans les zones amorphes, les chaînes de polymères sont disposées de façon aléatoire et inégale.

À l'échelle supramoléculaire, les cristaux de cellulose native forment des microfibrilles de 2 à 50 nm de large contenant de 15 à 45 chaînes dans un arrangement cristallin régulier. Les microfibrilles forment des lamelles qui sont reliées entre elles en section radiale d'une cellulose I $\beta$  cristalline par liaison hydrogène [21]. Ces lamelles entrent dans la composition des parois cellulaires formant des fibres. La représentation de cette description est affichée sur la figure 1. 10.



**Figure 1. 10** Schéma de la structure d'une fibrille de cellulose [32].

Les zones amorphes correspondent notamment aux chaînes en surface des cristaux qui seront d'autant plus nombreuses que la microfibrille sera fine. Le taux de zones amorphes est estimé

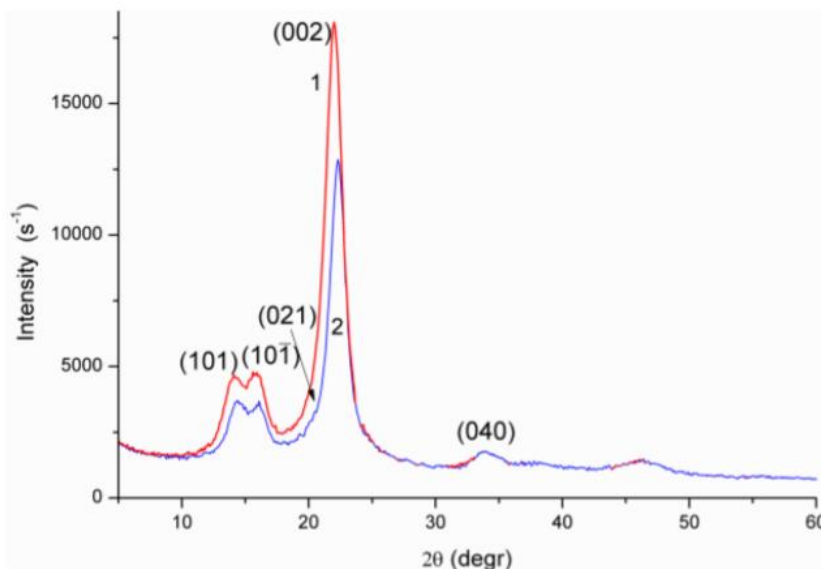
à 5% du total dans les microcristaux de tunicine (microcristaux de la cellulose de coton). Comme il y a aussi des zones amorphes dans les zones inter-cristallines [21].

Dans la littérature, les différents auteurs reconnaissent que la cellulose présente une grande partie de la phase cristalline mais elle n'est pas homogène et couvre une large gamme de taux de cristallinité allant de 40 - 80 % [21], en fonction de l'origine du polymère de cellulose de 40 à 50 % pour le bois, 60-70 % pour le coton et le lin et supérieur à 70 % pour certaines algues marines [33].

Une étude de la cristallinité et de la structure des fibres de coton et de lin par la méthode de diffraction par des rayons X (XRD) a été effectuée par I. Lyuba et al. (2012) [34] où ils ont estimé une cristallinité relative à partir de l'intensité intégrale de trois principaux pics de XRD et de la contribution amorphe positionnées à  $2\theta = 10-30^\circ$  est plus élevée pour le lin (73,2 %) que pour le coton (65,2 %). La disposition des micro-fibrilles dans l'axe de la fibre pour le lin, lui permet d'être plus cristallin que le coton. Les courbes de mesures sont contenues dans les figures 1. 11 et 12.

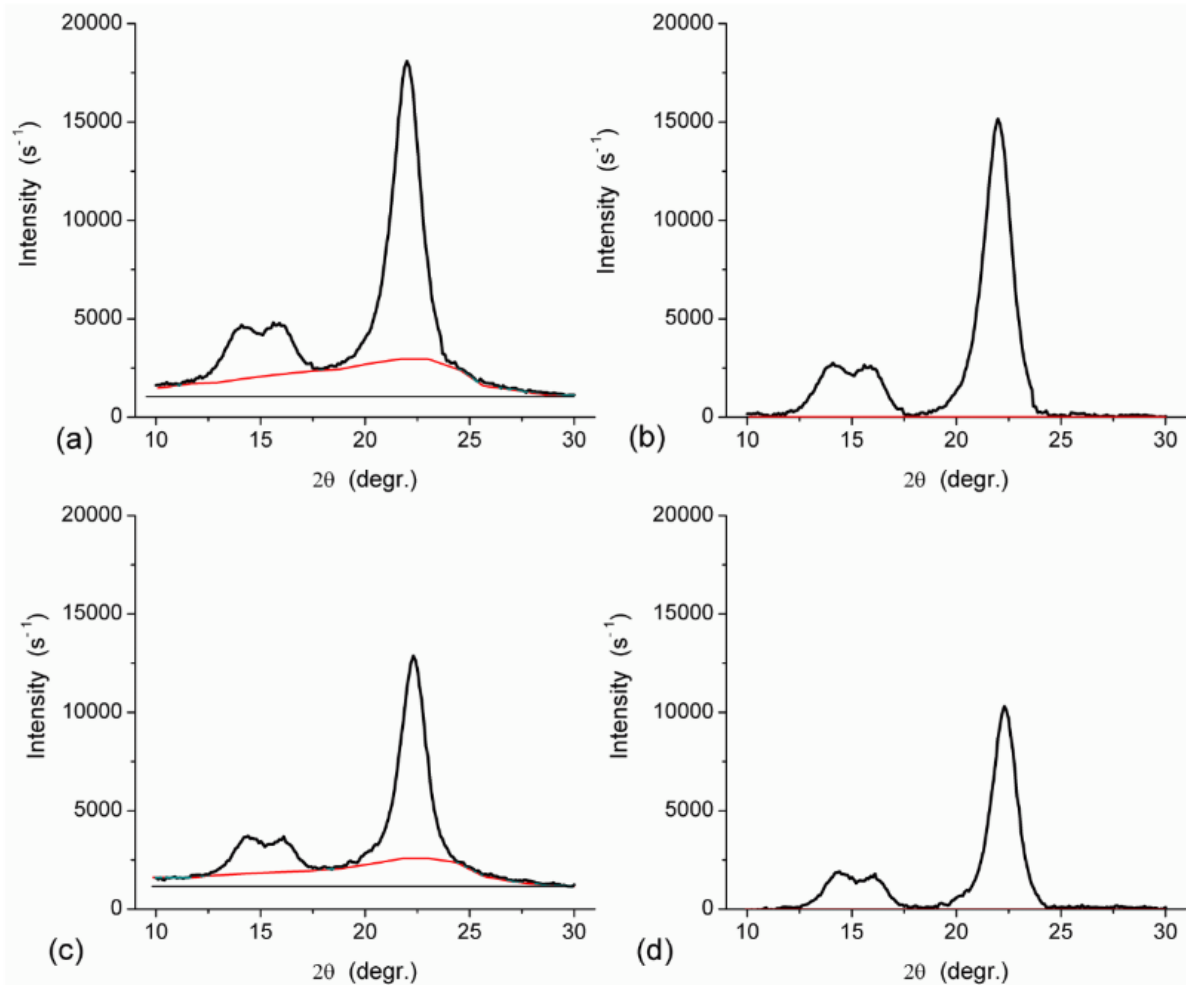
Une autre estimation plus simple de l'indice de cristallinité a été donnée dans la même étude en utilisant l'équation :  $IC (\%) = 100 \times (I_{002} - I_{am}) / I_{002}$  à partir de l'intensité du pic principal (002), figure 11, et de l'intensité de la partie amorphe ( $I_{am}$ ) en un point minimum à  $\sim 18^\circ$ , donne également une valeur de cristallinité plus élevée pour le lin (86,5 %) par rapport au coton (84,1 %).

La différence dans la cristallinité estimée à l'aide de l'intensité XRD intégrale (65-73 %) et maximale (84-87 %) est typique des matériaux cellulosiques [35]. De plus, les plus petites valeurs obtenues à partir de l'intensité intégrale sont semblables aux valeurs IC estimées à partir des mesures de la RMN (résonance magnétique nucléaire) des matériaux cellulosiques [36].



**Figure 1. 11** *Diffraction des rayons X des fibres de lin (courbe 1) et des fibres de coton (courbe 2).[34]*





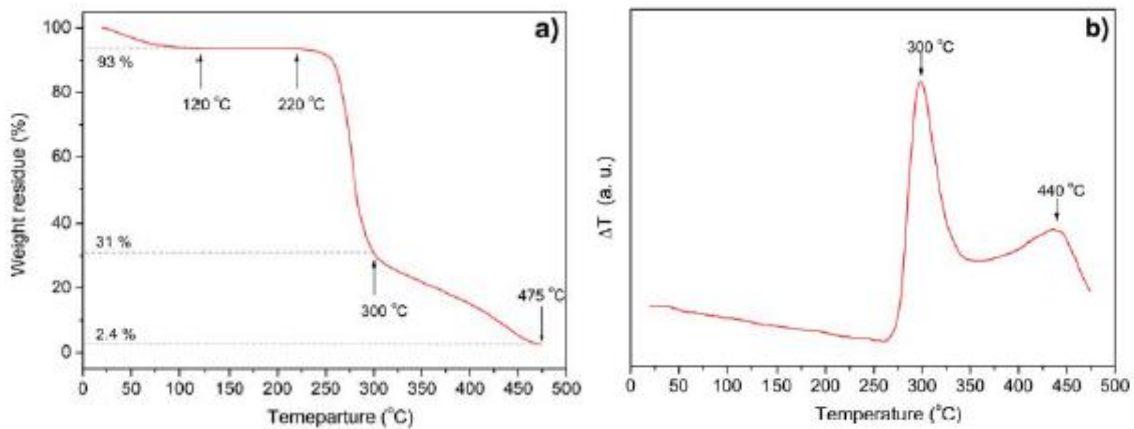
**Figure 1. 12** Détermination de la cristallinité à partir de l'intensité XRD intégrale des fractions cristallines et amorphes de (a, b) lin et (c, d) fibres de coton, (b, d) 10 profils après soustraction de la contribution de la partie amorphe. [34]

### 3.4 Stabilité thermique de la cellulose

Les interactions intra- et intermoléculaires existantes dans la cellulose lui confèrent une grande stabilité structurale. La cellulose conserve sa structure physico-chimique et ses propriétés mécaniques jusqu'à des températures au-delà de 200 °C [37]. Ainsi, la cellulose ne présente pas de température de fusion. Au lieu de fondre, elle se décompose à des températures élevées. Cependant, différentes grandeurs thermiques qui caractérisent la cellulose sont présentées sur le tableau 5.

**Tableau 5.** Propriétés thermiques de la cellulose

Grandeurs	Valeurs	Référence
Température de dégradation (°C)	280-330	(Klemm et al.,1998) [38]
Chaleur de combustion(kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	17,43 (coton)	(Mark, 1984 ; Mark et al.,1985) [39-40]
Chaleur spécifique Cp(J.g <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	1.21 à 1.36 (à 293 K)	(Mark, 1984) [39]
Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0,071 (coton) 0,037 - 0,040 (lin)	(Brandup and Immergut, 1989) [41]
Température de transition vitreuse Tg (°C) (avec une teneur en eau 0%)	220-245 (amorphe)	

**Figure 1.13** Courbes TGA (a) et DTA (b) de poudre de cellulose (vitesse de 10°C/min) [37].

Les analyses thermogravimétriques de poudre de cellulose (figure 1.13.a) [37], montrent qu'à l'augmentation de la température, dans l'expérience TGA, une perte de poids est observée sur la cellulose, ce qui signifie une dégradation du matériau. Cette dégradation est déclenchée dans les zones amorphes à partir des températures de 300 à 350 °C comme montré dans la figure 1.13.b).

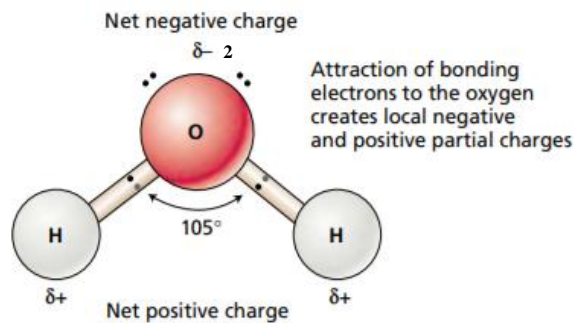
#### 4. Interaction de l'eau avec les matériaux textiles à base de cellulose

Les polymères textiles possèdent des groupements réactifs qui fixent plus ou moins fortement les molécules d'eau. Le coton et le lin, formés essentiellement de cellulose, représentent un caractère hydrophile à cause des trois groupements hydroxyles OH pour chaque élément glucose qui le constitue, ainsi les molécules d'eau peuvent se fixer sur la cellulose par des liaisons hydrogène.

##### 4.1 Propriétés physiques et structure moléculaire de l'eau

La molécule d'eau est constituée d'un atome d'oxygène lié par covalence à deux atomes d'hydrogène. Les deux liaisons O — H forment un angle de 105 ° (figure 1.14). Comme l'atome

d'oxygène est plus électronégatif que l'hydrogène, il a tendance à attirer les électrons de la liaison covalente. Cette attraction se traduit par une charge négative partielle à l'extrémité oxygène de la molécule et une charge positive partielle à chaque hydrogène.



**Figure 1. 14** Diagramme de la molécule d'eau, Les deux liaisons intramoléculaires hydrogène – oxygène forment un angle de  $105^\circ$ , Les charges partielles opposées ( $\delta^-$  et  $\delta^+$ ) sur la molécule d'eau conduisent à la formation de liaisons hydrogène intermoléculaires.

Ces charges partielles sont égales, donc la molécule d'eau ne porte aucune charge nette. Cette séparation des charges partielles, ainsi que la forme de la molécule d'eau, fait de l'eau une molécule polaire, et les charges partielles opposées entre les molécules d'eau voisines ont tendance à s'attirer. L'attraction électrostatique faible entre les molécules d'eau, connue sous le nom de liaison d'hydrogène, est responsable de beaucoup de propriétés physiques inhabituelles de l'eau. Des liaisons hydrogène peuvent également se former entre l'eau et d'autres molécules qui contiennent des atomes électronégatifs (O ou N).

Les propriétés physiques et chimiques de l'eau dépendent énormément de la température et la pression. En fait, les molécules d'eau sont en agitation continue, ce mouvement est moins important lorsque la température diminue et/ou la pression augmente favorisant ainsi la formation de plusieurs liaisons hydrogène [42].

## 4.2 Le phénomène de sorption

Le processus de sorption porte sur la dynamique de fixation ou de libération des molécules d'eau liées à la surface externe du matériau comme aussi toutes les surfaces des pores qui le constituent. La fixation des molécules d'eau [43] se fait soit :

- d'une manière réversible à l'aide des liaisons de faible intensité, généralement de type van der Waals, c'est le cas de la physisorption qui entraîne un faible dégagement de chaleur sans changement brutal ou structurel de la morphologie.
- d'une manière irréversible à l'aide des liaisons chimiques telles que les liaisons covalentes, c'est le cas de la chimi-sorption qui est caractérisée par un potentiel de sorption assez élevé.

## 4.3 Isothermes de sorption

L'activité  $a_w$  de l'eau dans un matériau dépend principalement de sa teneur en eau et de sa température. La courbe représentant pour une température  $T$  donnée la teneur en eau  $X$  d'un matériau en fonction de la valeur de l'activité de l'eau  $a_w$  ou de l'humidité relative  $HR$  de l'air en équilibre, figure 1. 15, est appelée :

- isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

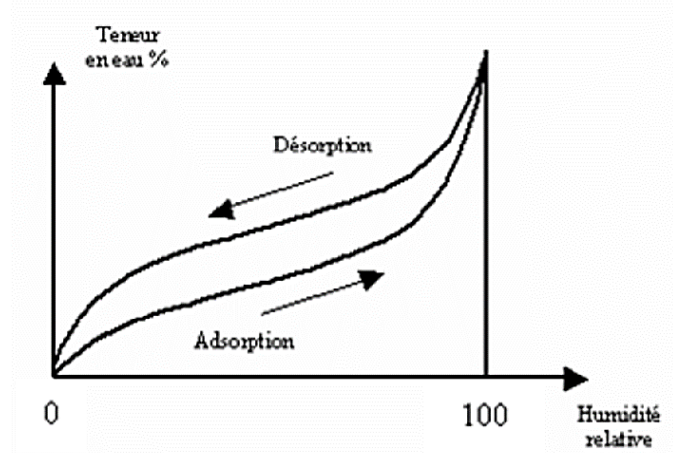


Figure 1. 15 L'isotherme d'adsorption et l'isotherme de désorption [43].

On note que l'activité de l'eau dans un matériau [44] est le rapport entre la pression de vapeur d'eau  $P_v$  à la surface du produit et la pression de vapeur saturante d'eau pure  $P_{vs}(T)$  à la température  $T$  de l'ambiance,

$$a_w = P_v / P_{vs}(T) \quad (I.1)$$

À l'équilibre, nous avons  $a_w(T_{eq}) = HR/100$  (I.2)

avec HR : l'humidité relative.

Les courbes des isothermes d'adsorption et les isothermes de désorption décrivent une courbe en forme de « S » marquées par la présence de deux points d'inflexion qui permettent de délimiter trois zones indiquées sur la figure 1. 16, dont chacune correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le matériau [45] :

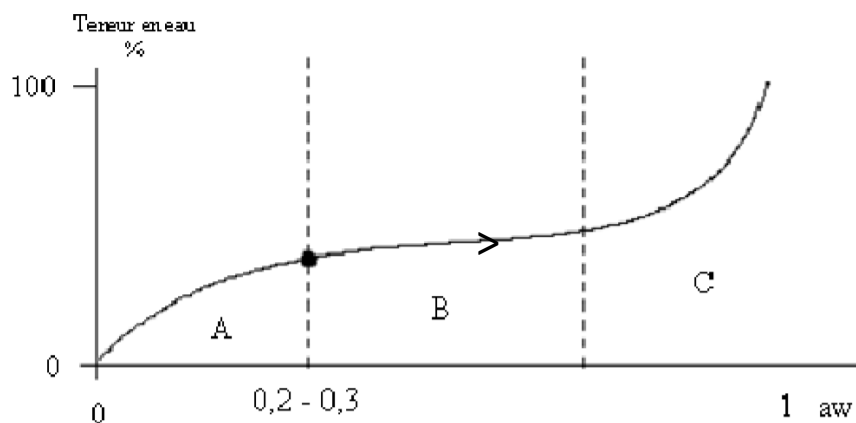


Figure 1. 16 Allure d'une isotherme de sorption

- **Zone A** : cette zone caractérise l'adsorption des molécules d'eau constituant la première couche recouvrant toute la surface du matériau. Le passage à la zone suivante s'effectue quand la monocouche est saturée.
- **Zone B** : la courbe dans cette zone est plus ou moins linéaire, elle représente l'adsorption des molécules d'eau sur la monocouche, donc elle caractérise l'eau faiblement liée.
- **Zone C** : cette zone caractérise l'eau libre apte à se déplacer par capillarité dans les micropores du matériau à l'équilibre.

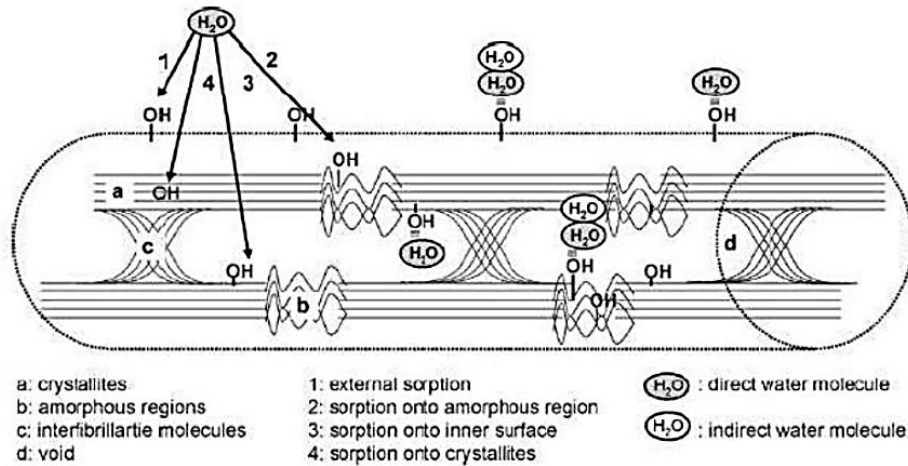
#### 4.4 Etats de l'eau dans les matériaux cellulosiques

À mesure que l'humidité augmente, en exposant une étoffe textile à la vapeur d'eau ou à l'eau à l'état liquide, l'eau est attirée par les groupes hydroxyles accessibles. Il y aura un équilibre entre l'énergie libre du mélange cellulose/eau et l'énergie libre de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Les premières molécules sorbées vont se fixer directement sur les sites les plus réactifs des fibres qui le constituent pour former l'eau liée. Puis au fur et à mesure que tous les sites hydrophiles seront occupés, les molécules d'eau seront déposées à la surface extérieure de la fibre par des liaisons directes puis indirectes, dans ce cas les forces d'attraction vont diminuer, jusqu'à aboutir à une simple condensation de l'eau dans les micropores, puis dans les pores [46].

Dans le cas des textiles le modèle de sorption d'eau le plus utilisé est celui de Langmuir bien qu'il soit moins précis que le modèle de BET (Brunauer, Emmet et Teller [47]). Ce qui signifie que l'eau peut se trouver dans le matériau textile dans deux états différents (figure 1.17) :

- **l'eau adsorbée ou libre** : Il s'agit principalement des premières couches d'eau absorbées facilement et fixées par les forces de Van der Waals, au niveau des surfaces du milieu et dans les zones amorphes. Ces molécules d'eau sont dites « libres » et peuvent s'évaporer facilement.
- **l'eau chimiquement liée** : Elle est retenue par l'ossature solide grâce à des liaisons hydrogène directes. Les molécules d'eau sont absorbées sur les cristaux et sur la surface interne du vide. Elles sont alors piégées et liées au squelette de la fibre. Ces molécules d'eau, qui s'infiltreront entre les chaînes de cellulose, se propageront entre les chaînes et faciliteront leur glissement qui conduira ensuite à perturber la disposition des microfibrilles, qui provoquent le gonflement des fibres. Ces molécules d'eau sont appelées eau « liée » qui correspond à un processus plus lent d'absorption et de désorption que l'eau « libre ».
- **l'eau capillaire** : À des humidités très élevées, une partie de l'eau sera retenue par les forces capillaires. Les résultats expérimentaux suggèrent que cette proportion est significative seulement au-dessus de 99 % RH, ce qui correspondrait à une taille de pore de 110 nm selon Morton et Hearle [48]. Cette eau est susceptible de s'écouler.

Enfin, d'autres molécules d'eau peuvent également se combiner avec de l'eau déjà liée à la fibre comme expliqué par Okubayashi et al, (2004) [49].

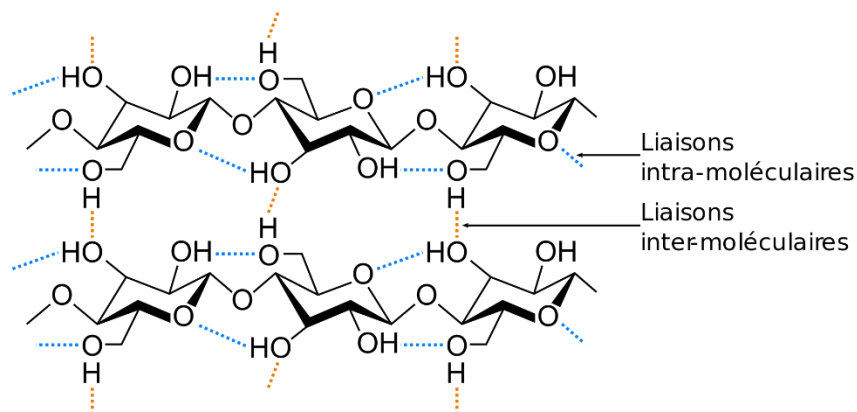


**Figure 1. 17** Représentation schématique de l'absorption d'eau : (1) surface externe de la fibre, (2) région amorphe, (3) surface interne des vides, (4) cristallites [Okubayashi et al., 2004].

Les fibres naturelles contiennent de l'eau sous forme libre et liée. Pour les fibres de lin, la quantité d'eau varie entre 7 et 10% en masse et de 6 à 8,5% pour les fibres de coton [50-51]. Cette eau est principalement liée aux pectines à la surface des fibres, ou à l'intérieur de la matrice polymérique entre les fibrilles de [52].

Comme expliqué précédemment, pour les fibres cellulosiques, la fixation des molécules d'eau se fait par l'intermédiaire des liaisons hydrogène avec des groupes hydroxyles existants sur la surface et à l'intérieur des polymères. Alors, une connaissance plus approfondie sur la disposition et le rôle de ces liaisons hydrogène est indispensable pour mieux comprendre les interactions de l'eau avec les matériaux cellulosiques.

Dans les chaînes de cellulose, les macromolécules sont alignées et liées les unes par rapport aux autres grâce à des liaisons hydrogène. On en trouve des liaisons hydrogène intramoléculaires et des liaisons intermoléculaires comme présenté dans la figure 1. 18.



**Figure 1. 18** Représentation schématique des liaisons hydrogène intramoléculaires et intermoléculaires des chaînes de cellulose (Navi & Heger, 2005) [53].

Pour les liaisons hydrogène intramoléculaires, on trouve deux types des liaisons [21] :

- Une liaison hydrogène intrachaîne entre le groupement hydroxyle O3 (figure 1. 9) d'un résidu et l'hydrogène intracyclique O5 d'un autre résidu apporte une stabilisation (O5---O3 : 2,75 Å). L'existence de cette liaison est une constante des

chaînes de cellulose ayant une conformation hélicoïdale d'ordre 2. Elle peut disparaître dès lors que d'autres conformations, relativement moins stables sur un plan énergétique, sont induites par des environnements extérieurs différents.

- On trouve aussi une deuxième liaison hydrogène intrachaîne (figure 1. 9) : O2-H--O6 (2,87 Å), qui apporterait un élément de stabilisation supplémentaire à la conformation de la chaîne de cellulose.

Il convient néanmoins de mentionner que la chaîne de cellulose peut adopter d'autres conformations de basse énergie, en particulier en surface des zones cristallines, où les contraintes d'empilements étant moins fortes et en région de zones amorphes.

A l'évidence les possibilités de formation de liaisons hydrogène intrachaînes, et interchaînes confèrent aux chaînes de cellulose plusieurs possibilités de former des architectures tridimensionnelles stables.

On peut conclure que la pénétration de l'eau dans la structure moléculaire des fibres textiles amène un changement de leurs caractéristiques physiques, morphologiques et dimensionnelles dû à la polarité des molécules d'eau donnant naissance à des liaisons hydrogène.

Dans la suite de cet exposé, nous présenterons l'effet de présence de l'eau au sein des fibres cellulosiques sur quelques propriétés de matériau liées à notre étude.

#### **4.5 Effet de l'humidité sur la température de transition vitreuse et sur les propriétés physico-mécaniques et des fibres de lin et de coton**

##### **4.5.1 La température de transition vitreuse**

La température de transition vitreuse est un point critique thermo-physique qui marque la transition morphologique d'un polymère amorphe ou semi cristallin d'un état solide rigide qualifié de vitreux à un autre état physique solide souple dans la phase amorphe qualifié de phase caoutchoutique. Le phénomène de transition est lié à des mouvements de segments de chaînes macromoléculaires situées dans les domaines amorphes.

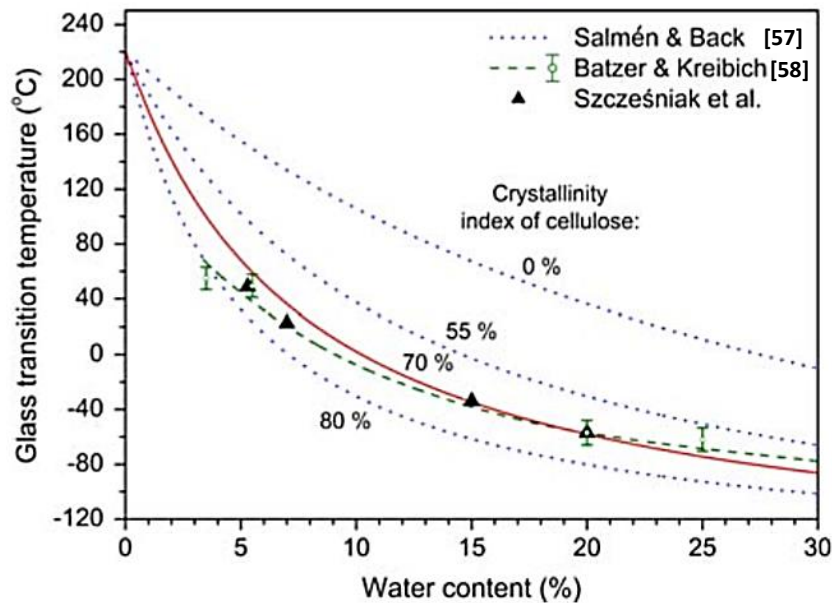
En dehors de cette température, les macromolécules présentent une faible mobilité relative. Dans la zone caoutchoutique le matériau acquiert une plus grande capacité de déformation. Ceci conduit à une modification plus ou moins profondes dans les propriétés physicomécaniques des matériaux.

À l'état sec, la détermination expérimentale de la Tg de la cellulose est très délicate, voire impossible car la zone de transition chevauche le domaine de dégradation. Par conséquent, il n'y a pas de zone franche que l'on peut attribuer au Tg de la cellulose dans les conditions normales de la mesure [54].

En revanche, la détermination du Tg devient possible lorsque la cellulose est humide. Plusieurs travaux, rapportés dans la littérature, ont été réalisés sur la détermination de la Tg à taux d'humidités relatives variables. En s'appuyant sur des modèles mathématiques et sur des résultats expérimentaux. Kargin et al. (1960) [55] propose une température de transition vitreuse à 439K pour la cellulose sèche en extrapolant la dépendance des solvants de Tg à la zéro-concentration.



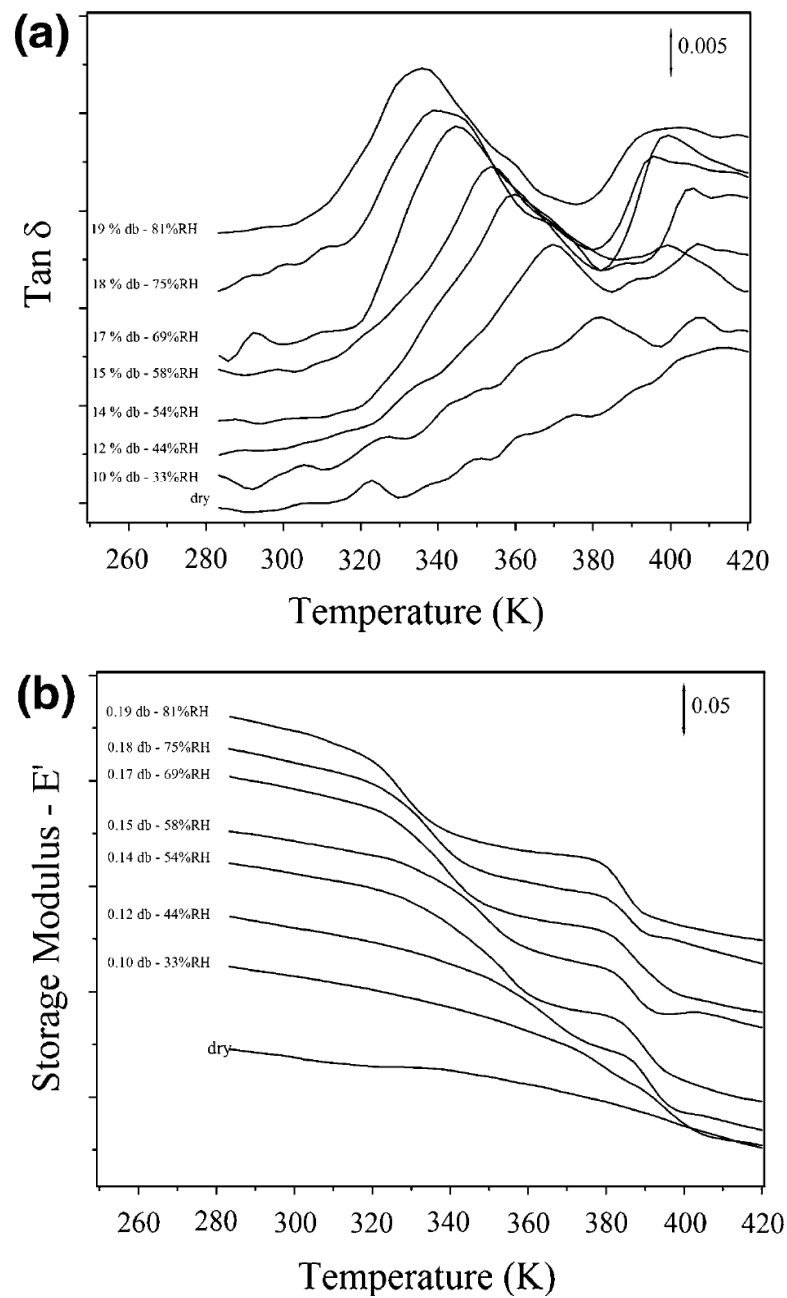
Plus récemment, Szczesniak et al. (2008) [56] ont étudié la transition vitreuse de la poudre microcristalline à différents contenus en eau (5.3, 7, 15 et 20%) par DSC, dont le résumé de différentes mesures (en triangle) est sur la figure 1. 19. Les différents résultats expérimentaux étaient en bon accord avec les prédictions théoriques de Salmén et Back (courbe rouge pour une cristallinité de 70%) pour les contenus en eau les plus élevées : 15 et 20% avec des valeurs de  $T_g$  respectives : -34 et -52 °C. D'autre part, pour les contenus d'eau les plus faibles (5.3 et 7%) les valeurs de  $T_g$  sont 48 et 22°C respectivement.



**Figure 1. 19** La  $T_g$  de la cellulose en fonction de teneur en eau : les points expérimentaux DSC pour 5,3, 7, 15 et 20 % d'eau (triangles), la ligne expérimentale de Batzer et Kreibich (ligne segmentée), l'approche de Kaelbe par Salmén et Back pour 0, 55, et 80% de l'indice de cristallinité (lignes pointillées), prédictions de Kaelbe pour IC de 70% (ligne continue) [56].

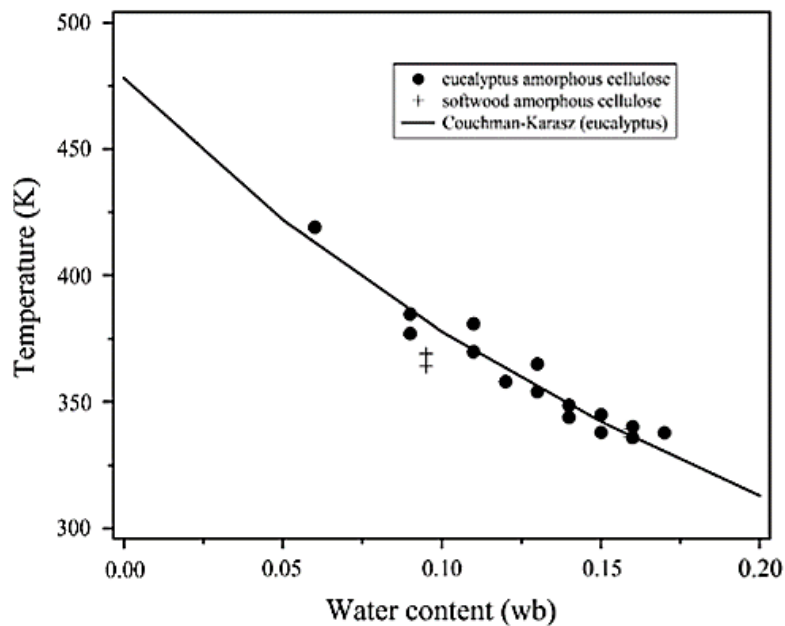
Dans une autre étude, Sabrina S. et al (2010) [59] ont pu déterminer les  $T_g$  de la cellulose en fonction de la teneur en eau avec une analyse mécanique dynamique (AMD) en suivant l'évolution du pic de  $\tan(\delta)$  et le module de conservation  $E'$  pour différentes valeur de RH à fréquence fixe comme le montre la figure 1. 20. Ils ont observé un déplacement de la position du maximum du pic  $\tan(\delta)$  vers les hautes températures de la  $T_g$  avec diminution de RH (figure 20.(a)). La même tendance est noté également pour le faisceau de courbes  $E'(T)$  sur la figure 20.(b). L'analyse et l'exploitation des courbes permettent de proposer, pour les premiers pics  $\tan(\delta)$  et premières inflexions de  $E'$ , des températures de 320 à 380 K comme valeurs de  $T_g$  en fonction d'humidité relative. En revanche les seconds pics et inflexions semblent ne pas dépendre de l'humidité relative.





**Figure 1. 20** a) Le pic de tan delta et (b) le module de conservation d'Young  $E'$  en fonction de la température (Sensibilité de mesures pour les échantillons de faible contenu en eau où on ne voit pas les deux transitions) [59].

Ensuite, et dans la même étude, les auteurs ont ajusté les données d'autres mesures par la méthode des moindres carrés non linéaires automatisée dans Excel Solver en appliquant l'équation Couchman-Karasz (1978) [60] pour évaluer la valeur de  $T_g$  de la cellulose amorphe sèche en fonction de la teneur d'eau. Les mesures avec l'équation de Couchman-Karasz sont illustrées sur la figure 1. 21.



**Figure 1. 21** La Tg en fonction de la teneur en eau exprimée sur une base humide pour le modèle Couchman-Karasz. Les données sont présentées pour les deux échantillons d'eucalyptus et de cellulose broyée en boule de résineux [52].

Les valeurs de Tg correspondantes aux taux d'humidité RH de 5% et 15% trouvées sont proches de celles établies par Szczesniak et al. [56].

Pour conclure, on note bien que la présence de d'eau conduit à une baisse de la température de transition vitreuse de la cellulose. En d'autres termes, l'eau absorbée agit comme un plastifiant affaiblissant les liaisons intermoléculaires et augmentant le volume libre ce qui facilite les mouvements moléculaires du polymère [60-61].

Nous déterminerons dans la partie expérimentale la Tg des échantillons en lin et en coton par DSC et nous établirons son influence sur la température de repassage.

#### 4.5.2 Les propriétés physico-mécaniques

La teneur en humidité des fibres cellulosiques dans les conditions standards, en fonction du taux des parties non cristallines et du vide dans la fibre, peut atteindre 12% pour le lin et 10% pour le coton de la masse totale dans des conditions standard [62-63]. La nature hydrophile de ces fibres naturelles influence les propriétés mécaniques globales. Plus l'absorption est grande, plus la perturbation des liaisons intermoléculaires est grande et, par conséquent, plus l'effet sur les propriétés mécaniques est grand. Toutes les fibres absorbantes subissent une augmentation de l'allongement à la rupture et une diminution du module initial et, à l'exception des fibres de cellulose, une diminution de la force de rupture. L'exception notée pour le coton, le lin, etc. peut avoir jusqu'à 20 % d'augmentation de la résistance à la traction avec mouillage [83]. Comme on peut le voir sur le tableau 6, la résistance à la traction et l'allongement à la rupture ont augmenté lorsque les fibres sont humides, notamment pour le coton et le lin. Les valeurs indiquées sur le tableau sont rapportées aux mesures des fibres non humides.

**Tableau 6.** Résistance et allongement à la rupture des fibres humides rapportés aux mesures des fibres sèches [64]

<b>Fibre</b>	<b>Résistance relative à la traction (humide) (%)</b>	<b>Allongement relatif (humide) (%)</b>
<b>Coton</b>	105 - 110	110 - 116
<b>Lin</b>	102 - 106	125 - 133
<b>Jute</b>	100 - 105	100
<b>Ramie</b>	115 - 125	100
<b>Sisal</b>	90 - 120	100

En augmentant la teneur en eau des fibres cellulosiques, ces dernières deviennent plus résistantes mécaniquement. Fondamentalement, cette amélioration de propriétés mécaniques est due à la diminution de la force cohésive entre les molécules de la chaîne due au gonflement et à la libération de la déformation interne par gonflement. Ainsi, dans la fibre cellulosique native, comme le coton, la libération de la contrainte interne entre les molécules à longue chaîne est prédominante et cela augmente la force de la fibre en raison d'une distribution interne plus uniforme des contraintes [65].

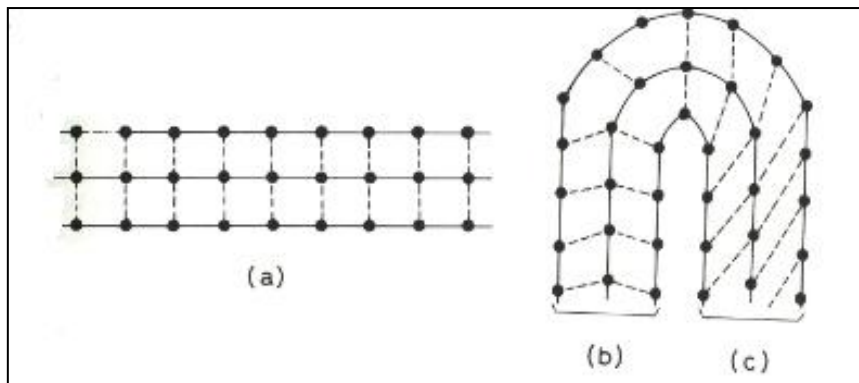
## **5. Mécanisme de froissement des fibres cellulosiques et défroissement par repassage**

### **5.1 La froissabilité**

Il est connu que le coton et le lin qui sont deux matériaux qui apportent le confort au porté grâce à leur caractère hydrophile, ils absorbent l'humidité corporelle et favorisent les échanges thermiques. Le point négatif pour le consommateur est la froissabilité de ces matières lors de l'usage, le stockage ou lavage. Le coton et le lin sont constitués par des enchaînements de motifs cellobiose (dérivé de cellulose) présentant de nombreux groupes hydroxyles (–OH). Ces groupes –OH interagissent entre eux pour former des liaisons hydrogène. La liaison hydrogène, bien que moins forte qu'une liaison covalente, est suffisamment forte pour assurer la cohésion entre deux chaînes de polymères.

La résistance au froissement ou au pli de ces fibres textiles est une propriété qui dépend essentiellement de l'arrangement structurel des zones amorphes. En effet, un haut degré d'orientation moléculaire et/ou un pourcentage de cristallinité élevé réduit la résistance au froissement. Meredith R. [66] a réalisé une étude comparative entre la résistance à la pliure des fibres cellulosiques et des fibres protéiniques et il a montré que la composition supramoléculaire des chaînes polypeptidiques offre une meilleure résistance au pli que celle des chaînes cellulosiques. Effectivement, la cohésion moléculaire entre les chaînes cellulosiques est effectuée à l'aide des liaisons hydrogène et des liaisons de van der Waals, alors que les fibres protéiniques sont composées de grilles en chaînes polypeptidiques maintenues par des liaisons chimiques primaires de grande énergie ce qui leur confère une flexibilité plus importante [67].

Dans l'ensemble, la froissabilité se définit donc comme la capacité d'une étoffe à former des plis sous l'action de contraintes mécaniques et/ou chimiques par le réarrangement des liaisons intermoléculaires, figure 1. 22. Il existe deux types différents de froissabilité : la froissabilité à sec et celle au mouillé.



**Figure 1. 22** Froissement et résistance au froissement : (a) Représentation schématique de la structure avec des liaisons intermoléculaires. (b) Formation de nouvelles liaisons transversales donnant un pli. (c) Tensions intermoléculaires menant à un pli [68].

### 5.1.1 La froissabilité à sec

Elle est obtenue par des contraintes mécaniques sur l'étoffe. En effet, des liaisons de types Van der Waals et hydrogènes sont présentes dans la structure. Elles sont réparties uniformément dans toutes les directions, ainsi le tissu est stable. Lors de l'application de contraintes extérieures (comme de flexion ou de compression), l'équilibre des forces est perturbé. Il y a donc un réarrangement des éléments de la structure du tissu, les forces internes s'orientent dans le sens des forces extérieures, ce qui engendre les plis typiques de la froissabilité.

### 5.1.2 La froissabilité au mouillé

Elle est obtenue par des contraintes mécaniques et chimiques appliquées au mouillé sur l'étoffe, cas de lavage par exemple.

En première étape la structure de la fibre se gonfle par l'absorption de molécules d'eau par les groupements hydroxyles entre les macromolécules de cellulose engendrant un réarrangement de la position de liaisons hydrogènes, dont le type de liaison est de faible énergie de l'ordre de 20 kJ/mol [69], et donc une modification de la position des chaînes cellulosiques les unes par rapport aux autres. Ce qui conduit à la formation des plis qui vont être fixés par la suite par le séchage.

Lors de l'étape de séchage, l'eau qui est présente dans le tissu est éliminée, ce qui entraîne une reformation différente de liaisons hydrogènes intermoléculaires par rapport à l'étape de prélavage. Il y a donc une fixation du pli de manière quasi irréversible sans l'action d'une étape de repassage.

## 5.2 Repassage ou défroissement hydro-thermique

L'élimination des plis dans les matières cellulosiques se présente de la même manière que le mécanisme de froissement.

Le dé-froissement nécessite de gonfler de nouveau la fibre de cellulose en présence de l'eau, par exemple la diffusion de molécules d'eau par la vapeur éjectée de central vapeur lors du repassage. Et d'ailleurs c'est pourquoi il est recommandé de repasser les textiles cellulosiques à l'état pas complètement sec. D'où l'existence de programmes de séchage non complet sur les sèche linge pour la cagoterie des textiles de coton par exemple.

Ensuite, on vient appliquer des contraintes mécaniques et calorifiques par une pression à plat avec la semelle du fer à repasser pour redresser la surface d'étoffe en rompant les liaisons d'hydrogène et formant une nouvelle disposition.

Enfin, pour fixer ce nouvel agencement, on intervient avec l'énergie calorifique émis par la semelle afin d'accélérer l'étape de séchage sans introduire cette fois ci la vapeur pour ne plus perturber les liaisons d'hydrogène.

On trouve dans l'industrie des traitements appliquées aux textiles notamment le coton pour éviter les plis et le froissage du coton. Le traitement d'infroissabilité est un apprêt chimique. C'est une sorte de résine qui fige les fibres dans une certaine position dont l'action se déroule comme suit :

- on fait agir sur les groupes hydroxyles un composé qui n'établit pas de liaisons hydrogène. On réalise cette opération par réaction avec des acides polycarboxyliques qui réagissent avec les – OH dans une réaction d'estérification. Cette réaction est réalisée alors que les zones amorphes sont mises par pressage à la forme voulue.

- l'effet secondaire de ce traitement est de rendre le coton hydrophobe. Il sèche alors plus vite mais se lie davantage aux graisses.

Ces traitements sont relativement coûteux, et réservés à certains types de vêtements (par exemple les chemises pour homme vendues comme « infroissables »).

### **5.3 Évaluation optique des surfaces froissées**

Le froissement et l'apparence d'une étoffe textile est l'une des propriétés les plus importantes de la performance et la qualité des tissus. D'autre part, la caractérisation de phénomène de froissement permet d'orienter les post-traitements de l'étoffe, ainsi que le domaine d'utilisation. Dans le cas de notre étude cette évaluation aura comme objectif de caractériser l'état de surface après différentes méthodes de repassage.

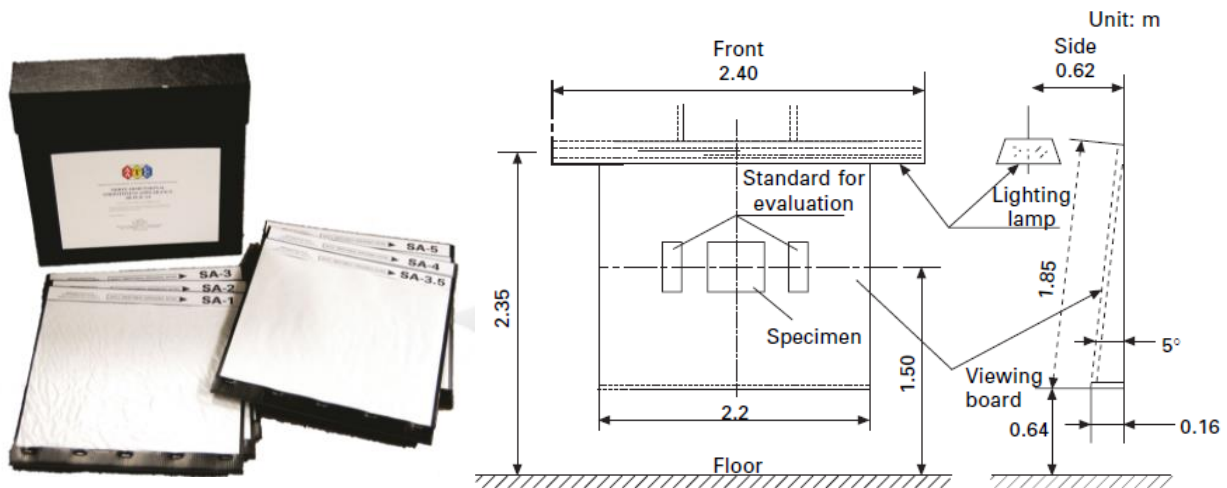
Pour évaluer l'état de surface des étoffes textiles, il existe deux types d'évaluation : l'évaluation subjective par des experts selon des méthodes standardisés et l'évaluation objective digitale soit par la technique de traitement d'image ou le scan 3D.

#### **5.3.1 Evaluation subjective du froissement**

L'industrie du textile a pendant longtemps utilisé des méthodes subjectives pour l'évaluation du froissement des étoffes. En effet, les étoffes ont été évaluées subjectivement en se référant à un ensemble de répliques d'apparence de froissement tridimensionnelle. Ces répliques sont juxtaposées à l'échantillon d'évaluation sur un mur incliné avec un certain angle et sous une source lumineuse sophistiquée. Les froissements observés sont rapportés à une échelle arbitraire allant de 5 (pas de froissement) à 1 (froissement très intense). Les différents

équipements de cette méthode sont illustrés sur la figure 1. 23. Ce principe a été développé par le comité « American Association of Textile Chemists and Colorists » (AATCC) en 1967 [70] sous la référence TM 124. Depuis, la même méthode a été adoptée par l'organisation de normalisation avec la méthode d'essai équivalente ISO 7768.

Bien que très utilisés jusqu'à présent, les jugements visuels du degré de froissement ne sont pas tout à fait fiables et très fastidieux, présentant souvent des confusions entre les jugements des observateurs qui sont influencées par la couleur et la texture du tissu.



**Figure 1. 23** La méthode AATCC d'évaluation de froissement, (a): Les répliques de référence (b) Equipement et matériel d'éclairage pour la visualisation des éprouvettes [71].

### 5.3.2 Evaluation objective du froissement des textiles

Contrairement à l'évaluation conventionnelle visuelle, les évaluations objectives sont plus rapides et plus fiables. Ainsi, beaucoup de méthodes ont été développés récemment qui permettent d'examiner la surface des étoffes avec différentes textures, armures et couleurs.

#### - Traitement d'image

Une de ces méthodes innovantes est celle de traitement d'image. La technique d'analyse d'image a fait des incursions dans beaucoup de domaines et elle constitue actuellement l'une des plus importantes orientations du traitement de l'information. On désigne par traitement d'image l'ensemble des techniques permettant de modifier une image numérique bidimensionnelle en une autre image, ou en une autre primitive formelle, dans le but de l'améliorer ou d'en extraire des informations. Cette analyse est conduite en trois étapes :

- **Acquisition d'image :** Il existe deux méthodes pour l'acquisition d'images numériques soit par un scanner 2D ou un appareil photo numérique où on aura comme sortie un image numérique visible et compréhensible par logiciel dédié.
- **Traitement d'image :** Les utilisations des logiciels spécifiques comprennent la suppression du flou d'une image, le lissage et filtrage pour la suppression de l'armure de l'étoffe ou l'apparence des fils, des taches ou du bruit d'une image, l'amélioration

du contraste ou d'autres propriétés visuelles d'une image avant son affichage, la segmentation d'une image, agrandissement, réduction ou rotation d'une image, et le codage de l'image, d'une manière efficace pour le stockage ou la transmission.

L'objectif principal de l'amélioration de l'image est de traiter une image donnée afin que l'image résultante soit de meilleure qualité que l'image originale pour une application spécifique.

- **Analyse des caractéristiques d'image :** Quantification de l'image traitée en fournissant des indices quantitatifs ou géométriques pour tirer les informations utiles afin d'évaluer les caractéristiques de froissement.

Des travaux de recherche ont été menés sur ce type de méthode. Par exemple, Xu et Reed [72] ont numérisé les répliques standard AATCC et ont défini deux variables : rapport de surface et rapport de teinte, pour quantifier l'apparence froissée, puis ont étudié la corrélation entre ces deux paramètres et les grades subjectifs à l'aide d'une méthode de régression non linéaire pour générer le grade de jugement d'évaluation objective. Na et Pourdeyhimi [73] ont analysé aussi les répliques de l'AATCC en utilisant une combinaison de technique d'analyse de texture et de profil. Leurs recherches montrent que les froissements peuvent être mesurés de manière fiable à l'aide de l'échelle de gris et de statistiques de surface.

Cependant, les méthodes précédentes ne fonctionnent pas bien lorsque les tissus ont des couleurs différentes et des motifs irréguliers, parce que les images grises 2D ne peuvent pas décrire l'état 3D des surfaces de tissu et peuvent confondre certaines nuances de couleur ou de motif avec des informations sur les reliefs de surface. Plusieurs chercheurs ont essayé de mettre au point un nouveau système permettant de mesurer objectivement et précisément le degré de froissement des tissus, quels que soient les motifs et les couleurs des tissus. Avec des projecteurs à ligne laser comme sources lumineuses, de tels systèmes d'évaluation basés sur des algorithmes ont été développés à l'aide de l'analyse d'images en 3D.

### - Scan 3D

Le scanner corporel 3D est une autre adaptation de la capture des caractéristiques des surfaces de tissu assistée par ordinateur. On trouve différents scanner 3D avec différentes technologies (stéréovision, lumière de structure laser...) et configurations pour capturer l'allure complète (données du nuage de points) de l'échantillon.

Les données capturées sont ensuite traitées à l'aide d'un logiciel pour générer une surface 3D de l'objet scanné. L'avantage de la caractérisation des froissements par le scan 3D est l'élimination de l'influence de la couleur et l'armure du tissu scanné.

Cette méthode de caractérisation est très récente et encore en cours de développement dans les applications textiles. Par contre, on peut trouver d'autres études dans la littérature qui exploitent la technologie du scan 3D complétée par la technique de traitement d'image. L'intégration de ces deux méthodes permettent de faire une cartographie complète de la surface d'un textile tout en relevant les fonctionnalités nécessaires. Par exemple Jinlian HU et al. [74] ont pu trouver une bonne corrélation entre leur étude objective, qui intègre la méthode de stéréo photométrie et la technique d'analyse d'image, et les grades subjectifs AATCC. Dans un autre rapport de

recherche, Yiliang WANG et al. [75] ont investigué la technologie de reconstruction de profil de surface 3D pour l'évaluation automatique de l'aspect de surface du tissu en transformant des points de nuages 3D en un plan d'image 2D pour faciliter l'extraction des fonctionnalités.

Bien que ces méthodes objectives évitent la perte du temps et la confusion de jugement, elles ne sont pas très utilisées dans la pratique industrielle. Elles sont encore dans la phase de développement.

## 6. Transfert thermique

La chaleur émise par la semelle d'une centrale vapeur ou une semelle d'un fer à repasser est transmise à l'étoffe textile à repasser. Cette chaleur suit un profil bien déterminé tout au long de l'épaisseur du tissu qui dépend de ce dernier et aussi de la nature du matériau. Il en résulte une différence de température sur les deux côtés de l'étoffe. Afin d'analyser et de comprendre les échanges thermiques entre un support textile et une source de chaleur en l'occurrence fer à repasser avec ou sans vapeur d'eau, nous exposerons les différents modes de transfert de chaleur.

On distingue trois types de transfert thermique, qui peuvent coexister : conduction, convection et rayonnement. Dans la suite de notre exposé, nous nous focalisons sur deux modes de transfert thermique, la conduction et la convection thermique.

### 6.1 Le transfert thermique par conduction

La conduction ou la diffusion est un échange d'énergie se réalisant sans déplacement de matière : il concerne donc les solides et les fluides immobilisés. Ce transfert peut se réaliser par contact entre deux corps. La conductivité thermique est une propriété intrinsèque qui caractérise l'aptitude du transfert thermique d'un matériau donné.

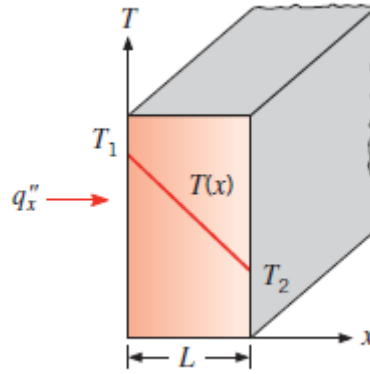
Les processus de transfert de chaleur peuvent être quantifiés en termes d'équation principalement grâce à la loi de Fourier pour la conduction thermique. Ces équations peuvent être utilisées pour calculer la quantité d'énergie transférée par unité de temps.

Pour la paroi plane unidimensionnelle illustrée à la figure 1. 24, ayant une distribution de température  $T(x)$ , l'équation du flux est exprimée comme suit :

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (I.3)$$

Le flux de chaleur  $q_x''$  ( $\text{W/m}^2$ ) est le taux de transfert de chaleur dans la direction  $x$  par unité de surface perpendiculaire à la direction du transfert, et il est proportionnel au gradient de température,  $dT/dx$ , dans cette direction. Le paramètre  $k$  est une propriété de transport connue sous le nom de conductivité thermique ( $\text{W/m K}$ ) et est une caractéristique du matériau de paroi. Le signe négatif est une conséquence du fait que la chaleur est transférée dans le sens d'une température décroissante.





**Figure 1. 24** Transfert de chaleur unidimensionnel par conduction (diffusion de l'énergie)

Dans le cas le plus simple d'une paroi d'épaisseur  $L$  solide et dans les conditions stables indiquées à la figure 1. 24, où la distribution de la température est linéaire, le gradient de température peut être exprimé comme suit :

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (\text{I.4})$$

D'où l'expression de flux de chaleur devient :

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (\text{I.5})$$

## 6.2 Le transfert thermique par convection

Le transfert thermique par convection est dû au mouvement de molécules qui induit un déplacement de l'énergie thermique : il se produit dans les liquides ou gaz et à l'interface entre un solide et un fluide. Ces molécules, en se déplaçant, elles transfèrent leur énergie thermique à une autre partie du système. On peut distinguer deux types de convection.

- La convection naturelle (ou libre) est due à la différence de masse volumique entre les particules composant le fluide. Les particules des zones chaudes, de masse volumique plus faible, montent et laissent leur place à des particules plus froides ; elles cèdent une partie de l'énergie thermique et leur température diminue, ce qui les pousse à rejoindre une partie plus chaude. Un radiateur électrique sans ventilateur ni soufflerie va naturellement par exemple diffuser de l'air chaud.
- La convection forcée est due à la mise en mouvement du fluide par une action extérieure gérée par un système mécanique qui entraîne les molécules vers le système chauffant. Le mouvement facilite alors le transfert thermique.

Quoi qu'il en soit la nature du processus de transfert de chaleur par convection, l'équation de flux thermique appropriée est de la forme :

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (\text{I.6})$$

Où  $q''$  est le flux de chaleur convectif ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), est proportionnel à la différence entre les températures de surface et de fluide,  $T_s$  et  $T_\infty$ , respectivement. Cette expression est connue comme la loi de refroidissement de Newton, et le paramètre  $h$  ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ ) est appelé le coefficient de transfert de chaleur par convection. Ce coefficient dépend des conditions de la couche limite, qui sont influencées par la géométrie de surface, la nature du mouvement du fluide et un assortiment de propriétés thermodynamiques et de transport du fluide.

Lorsque l'équation éq. (I.6) est utilisée, le flux de chaleur de convection est présumé positif si la chaleur est transférée de la surface ( $T_s > T_\infty$ ) et négatif si la chaleur est transférée à la surface ( $T_s < T_\infty$ ).

Le transfert de chaleur par convection apparaît aussi fréquemment comme condition limite dans la solution des problèmes de conduction.

### 6.3 Distribution de chaleur unidimensionnelle dans une paroi plane

Dans le cas de repassage, la chaleur est transférée par diffusion dans des conditions unidimensionnelles et stationnaires. Le terme unidimensionnel fait référence au fait que les gradients de température n'existent que dans une seule direction coordonnée et que le transfert de chaleur se produit exclusivement dans cette direction. Le système est caractérisé par des conditions stationnaires si la température à chaque point est indépendante du temps.

La géométrie de l'étoffe textile fait que le transfert thermique soit une conduction unidimensionnelle dans une paroi plane. Pour cela on s'intéressera plus à l'étude de distribution de chaleur unidimensionnelle dans une paroi plane. Dans la figure 1. 25, une paroi plane sépare deux fluides de températures différentes. Le transfert de chaleur se produit par convection du fluide (liquide ou gaz) chaud à  $T_{\infty,1}$  à une surface de la paroi à  $T_{s,1}$ , par conduction à travers la paroi, et par convection de l'autre surface de la paroi à  $T_{s,2}$  au fluide froid à  $T_{\infty,2}$ .

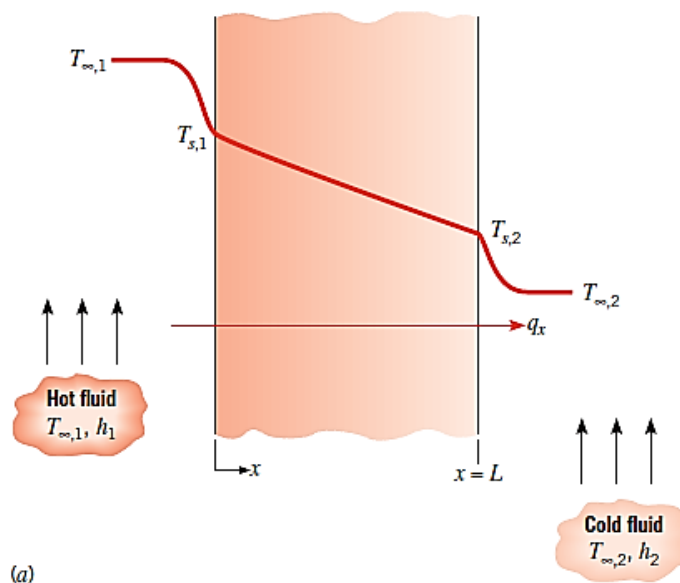


Figure 1. 25 Transfert de chaleur à travers une paroi plane.

La distribution de la température dans la paroi peut être déterminée en résolvant l'équation de la chaleur avec les conditions limites appropriées. Pour les conditions stationnaires où il n'y a pas de source répartie ou de puits d'énergie dans la paroi, la forme appropriée de l'équation de la chaleur est l'équation :

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (I.7)$$

La conductivité thermique du matériau de paroi est supposée être constante, l'équation peut être intégrée deux fois pour obtenir la solution générale :

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (I.8)$$

Ensuite une introduction des conditions limites à  $T(x=0)$  et  $T(x=L)$  est appliquée, figure 25, pour déterminer les constantes  $C_1$  et  $C_2$  [76]. On obtient finalement la distribution de chaleur sous la forme d'expression suivante :

$$T(x) = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1} \quad (I.9)$$

De ce résultat, il est évident que, pour une conduction unidimensionnelle à l'état stable dans une paroi plane sans production de chaleur et une conductivité thermique constante, la température varie linéairement avec  $x$ .

Dans la partie expérimentale, nous développerons un modèle de transfert thermique original permettant de corrélérer les calculs théoriques de transfert de chaleur aux résultats expérimentaux.

## 7. Propriétés mécaniques des matériaux cellulosiques

### 7.1 Propriétés mécaniques en statique des fibres de lin et du coton

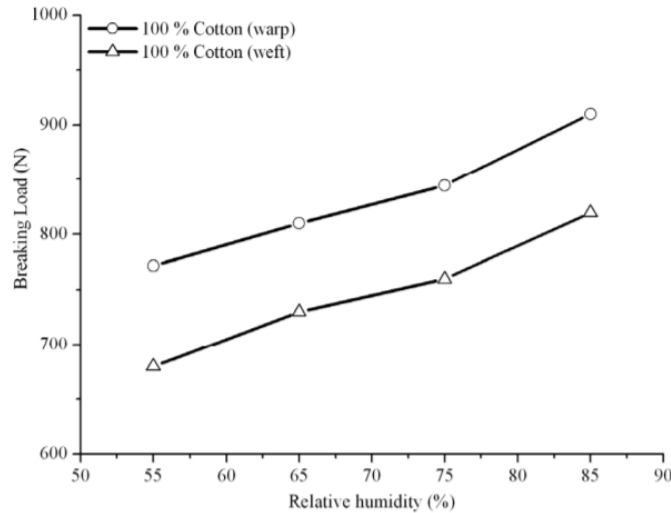
Les fibres de coton et de lin sont les fibres les plus solides de fibres naturelles possédant des propriétés mécaniques assez résistants. Sur le tableau 7 on retrouve quelques caractéristiques mécaniques des fibres de lin et du coton.

A l'évidence, le lin est légèrement plus robuste que le coton étant donné que la disposition de ses microfibrilles est orientée dans l'axe de la fibre comme présenté précédemment dans la section 3.3.

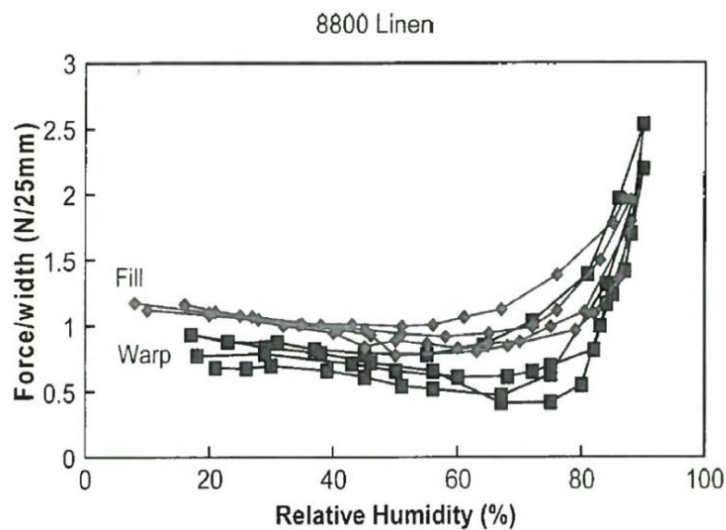
**Tableau 7.** Quelques propriétés mécaniques des fibres de lin et du coton [77-78-79-80].

Fibres	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Allongement à la rupture(%)	Contrainte à la rupture (MPa)	Module de Young(Gpa)	Récupération élastique à 2% d'allongement
<b>Coton</b>	1,5 – 1,6	3 - 10	287 - 597	5,5 - 12,6	75%
<b>Lin</b>	1,4 – 1,5	1,2 – 3,2	345 - 1035	27,6 - 80	65%

Ces propriétés, en augmentant la teneur en humidité au sein des fibres, peuvent être accentuées dans le sens que les fibres deviennent plus extensibles et plus résistantes à la rupture comme cela a été montré antérieurement dans la section 4.5. Des exemples de mesures des forces à la rupture et contraintes à la rupture des tissus en coton et en lin sont illustrés sur les figures 1. 26 et 27.



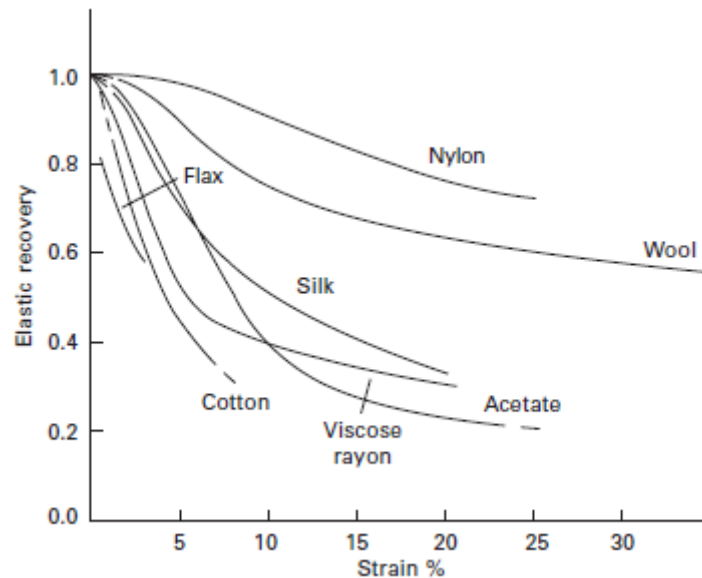
**Figure 1. 26** Résistance à la traction du coton dans le sens de la chaîne et de la trame à différentes valeurs d'humidité relative [81].



**Figure 1. 27** Résistance à la traction d'une toile en lin dans le sens de la chaîne et de la trame à différentes valeurs d'humidité relative Les deux directions de tissage chaîne et remplissage (trame) ont été tendues et les forces enregistrées en cycles RH répétés [82].

Tandis que la récupération de l'humidité s'occupe de l'absorption à diverses humidités relatives, la déformation ou le changement de longueur est également affecté par les changements de l'humidité relative. Le coton et le lin deviennent légèrement plus extensibles, mais pas autant que les fibres protéiniques comme la soie et la laine [80]. Les scientifiques du textile définissent cette capacité à l'allongement avec la capacité de retourner à la longueur initiale avant déformation (récupération). Différentes fibres présentent différents niveaux de récupération : le lin a une faible récupération lorsqu'il est retiré à 2% en longueur (figure 1. 28).

L'augmentation de l'humidité relative (de 60 % à 90 %) entraîne une récupération plus élastique des fibres cellulosiques [80] ; la laine et la soie gagnent une plus grande récupération élastique à une humidité relative plus élevée.



**Figure 1. 28** Propriétés de récupération élastique des fibres textiles [83].

## 7.2 Phénomènes transitoires, viscoélasticité et relaxation des contraintes internes

La cellulose est un polymère naturel (biopolymère) semi cristallin. Lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques, il réagit en fonction du niveau de la sollicitation mécanique et sa durée. On observe deux réponses mécaniques, l'une est purement élastique et l'autre visqueux d'origine entropique. La réponse globale de matériau à la sollicitation mécanique est donc une combinaison visco-élastique que l'on peut quantifier par une équation analytique du type :

$$\sigma_T = \sigma_e + \sigma_v \quad (I.10)$$

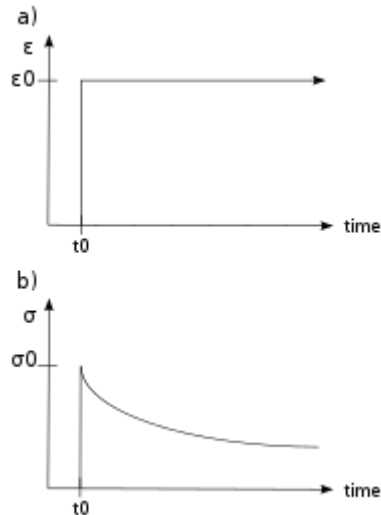
Où  $\sigma_T$  la contrainte totale,  $\sigma_e$  la contrainte élastique et  $\sigma_v$  la contrainte visqueuse.

### 7.2.1 La relaxation

Dans la science des matériaux, la relaxation de contrainte est la diminution observée de la contrainte en réponse à la tension générée dans la structure. Elle dépend essentiellement de la reconstitution des liaisons secondaires de faibles énergies dans les régions amorphes. Pour la plupart des fibres textiles, la diminution de contrainte, à un allongement constant, est globalement proportionnelle au logarithme du temps. Cela est principalement dû au maintien de la structure dans un état tendu pendant un certain intervalle de temps, figure 1. 29.a, et donc causer une certaine quantité de déformation élastique et plastique. Cela ne doit pas être confondu avec le fluage, qui est un état de charge constant avec une quantité croissante de tension.

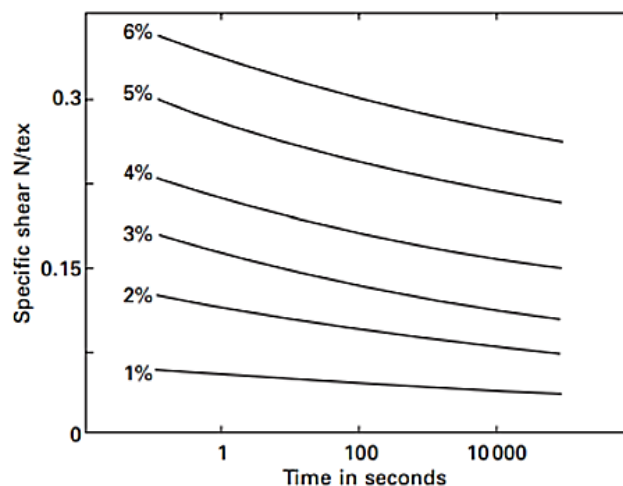
La quantité de relaxation qui a lieu est une fonction du temps, de la température et du niveau de contrainte appliqué.

La relaxation de contrainte décrit comment le matériau dissipe les charges sous déformation constante en fonction de temps, figure 1. 29.b.



**Figure 1. 29** a) Contrainte appliquée avec une déformation constante b) contrainte induite en fonction du temps pour un matériau viscoélastique.

Un exemple d'essai de relaxation sur du coton maintenu à une déformation constante est présenté sur la figure 1. 30, où on voit bien la contrainte de relaxation qui diminue au cours de temps. En effet, ces essais réalisés par Meredith (1954) [84] démontrent que la contrainte diminue de 7% environ pour chaque décuplement du temps. Il a exposé par la suite que la diminution de contrainte de relaxation est proportionnelle au logarithme du temps.



**Figure 1. 30** Courbes de relaxation de contrainte du coton à différents taux de déformation à 65% rh, 20°C (Merdeith 1954) [84].

### 7.2.2 Notion de base de la rhéologie

Les caractéristiques mécaniques des matériaux (élasticité, viscosité, plasticité...) représentées par des modèles mécaniques analogiques permettant de simuler à la fois le comportement élastique et visqueux. En fait, la rhéologie est une branche de la physique qui étudie les déformations des corps sous l'effet des contraintes qui leurs sont appliquées, compte tenue de la variation de ces contraintes en fonction de temps.

La cellulose est un polymère viscoélastique. Où la viscoélasticité est un comportement rhéologique intermédiaire entre :

- L'élasticité représenté par un ressort de module élastique  $E$ . lorsque la force appliquée est supprimée, il revient à sa position de départ ainsi il y a élasticité qui se traduit par la loi de Hook. L'élasticité d'un matériau traduit sa capacité à conserver et restituer de l'énergie après déformation. L'équation rhéologique respective reliant les déformations  $\varepsilon$  aux contraintes  $\sigma$  est comme suit :

$$\sigma_E = E\varepsilon$$



$\sigma_E$  : contrainte élastique

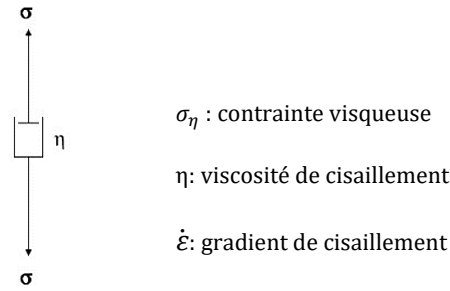
$E$  : module de Young

$\varepsilon$  : déformation

**Figure 1. 31** Représentation rhéologique d'un solide élastique.

- La viscosité exprimée par la loi de Newton, celui d'un liquide visqueux de type newtonien, représenté par un amortisseur de coefficient de viscosité  $\eta$ . La viscosité d'un matériau traduit sa capacité à dissiper de l'énergie. Ce comportement se traduit par la loi de Newton. L'équation rhéologique respective reliant les déformations  $\varepsilon$  aux contraintes  $\sigma$  est comme suit :

$$\sigma_\eta = \eta \frac{d\varepsilon_\eta}{dt} \quad \text{ou} \quad \sigma_\eta = \eta \dot{\varepsilon} \quad (\text{I.11})$$



**Figure 1. 32** Représentation rhéologique d'un liquide newtonien.

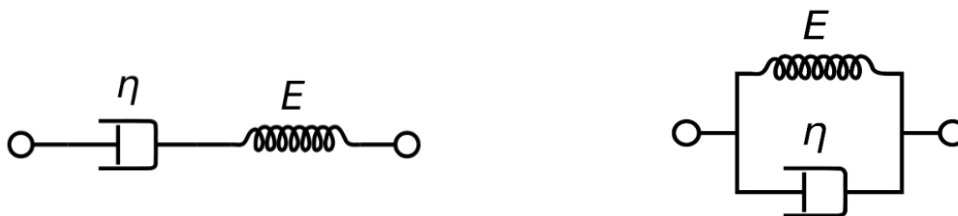
Les fibres cellulosiques présentent à la fois les propriétés d'un solide élastique, mais aussi celles d'un fluide visqueux. Etant donné qu'ils sont des polymères semi-cristallins, leur comportement viscoélastique est fortement affecté par leur morphologie.

Leur réponse à une sollicitation, que ce soit en relaxation de contrainte ou en fluage, dépend du temps, de la température et du niveau de contrainte ou de déformation.

Parce qu'ils sont viscoélastiques et semi-cristallins, les fibres cellulosiques se comportent de manière non linéaire, non-newtonienne. Cette non linéarité est décrite à la fois par la relaxation des contraintes et par un phénomène connu sous le nom de fluage.

### 7.2.3 Modèles analogiques

Les matériaux viscoélastiques ont les propriétés des matériaux visqueux et élastiques et peuvent être modélisés en combinant des éléments qui représentent ces caractéristiques. Un modèle viscoélastique, appelé modèle Maxwell montré sur figure 1. 33(a), prédit un comportement proche d'un ressort (élément élastique) étant en série avec un amortisseur (élément visqueux), tandis que le modèle de Kelvin-Voigt, figure 1. 33(b), place ces éléments en parallèle. Bien que le modèle Maxwell soit bon pour prédire la relaxation de la contrainte, il est assez faible pour prédire le fluage. D'autre part, le modèle Voigt est bon pour prédire le fluage, mais plutôt mauvais pour prédire la relaxation du stress.



**Figure 1. 33** (a) modèle rhéologique de Maxwell

(b) Modèle rhéologique de Kelvin-Voight

Dans la configuration de Maxwell, sous une contrainte axiale appliquée, la contrainte totale,  $\sigma_{\text{Total}}$  et la déformation totale,  $\epsilon_{\text{Total}}$  peuvent être définies comme suit :



$$\begin{cases} \sigma_{Total} = \sigma_l = \sigma_S \\ \varepsilon_{Total} = \varepsilon_D + \varepsilon_S \end{cases} \quad (I.12)$$

Où l'indice D indique la contrainte dans l'amortisseur (dashpot) et l'indice S indique la contrainte dans le ressort (spring). En prenant le dérivé de la déformation par rapport au temps, nous obtenons :

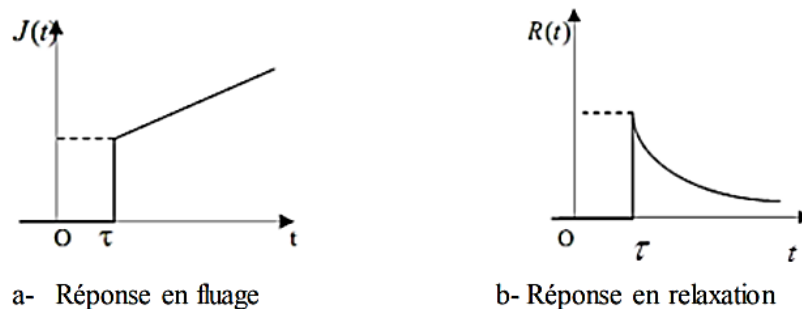
$$\frac{d\varepsilon_{Total}}{dt} = \frac{d\varepsilon_D}{dt} + \frac{d\varepsilon_S}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (I.13)$$

Après intégration de l'équation (1.3), on trouve les expressions de la fonction de fluage et celle de relaxation :

$$\begin{cases} J(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta} \\ R(t) = E_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases} \quad (I.14)$$

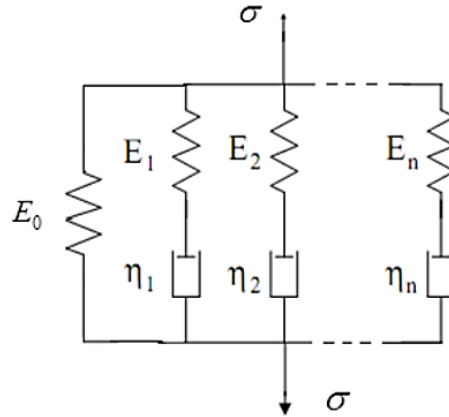
avec  $\tau = \frac{\eta}{E_0}$  qui est le temps de relaxation de notre fonction de relaxation. Il est relié au mouvement des chaînes de polymère au sein du matériau, qui se réarrangent au cours de la déformation.

Les réponses de ces deux fonctions sont représentées sur la figure 1. 34 ci-dessous :



**Figure 1. 34** Réponses en fluage et en relaxation du modèle de Maxwell

Le comportement visco-élastique d'un polymère peut être simulé par l'un ou l'autre des modèles de Maxwell ou de Voigt généralisé, suivant une réponse en relaxation ou en fluage. Pour pouvoir modéliser au plus juste les solides déformables étudiés, on opte pour les modèles généralisés [85]. Dans notre travail, nous étudierons le modèle de Maxwell généralisé dont il est formé d'un assemblage en parallèle de n modèle de Maxwell et élément élastique comme c'est montré sur la figure 1. 35.



**Figure 1. 35** Modèle de Maxwell généralisé

Dont l'équation s'écrit :

$$\sum_{k=1}^n \left( \eta_k \frac{d\sigma}{dt} + E_k \sigma \right) = \sum_{k=1}^n \left( E_k \eta_k \frac{d\varepsilon}{dt} + E_0 \eta_k \frac{d\varepsilon}{dt} + E_0 E_k \varepsilon \right) \quad (\text{I.15})$$

La fonction de relaxation de cette équation est donnée par :

$$R(t) = E_0 + \sum_{k=1}^n E_k e^{-\frac{E_k}{\eta_k} t} = E_0 + \sum_{k=1}^n E_k e^{-\frac{t}{\tau_k}} \quad (\text{I.16})$$

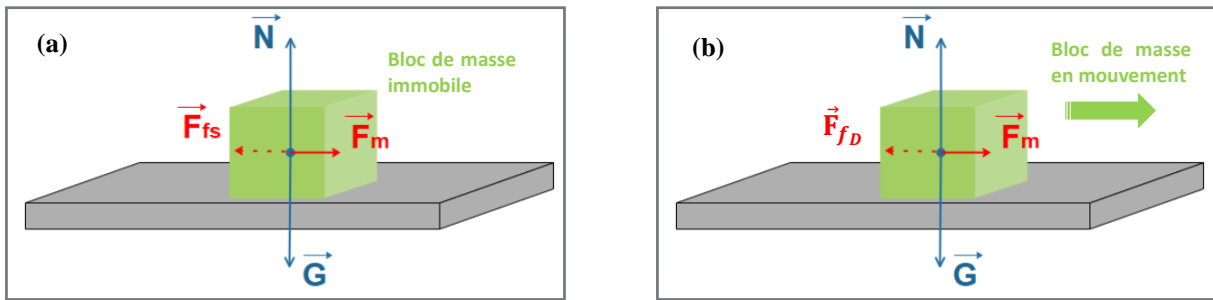
### 7.3 Tribologie des matériaux textiles

La tribologie est l'étude des phénomènes susceptibles de se produire dans un contact entre deux surfaces se déplaçant l'une par rapport à l'autre [86], Ce domaine scientifique recouvre à la fois la compréhension des phénomènes de frottement mais aussi de lubrification et d'usure. L'étude de la tribologie d'étoffe textile comporte ces trois aspects.

Un 'frottement' intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement appelée effort de frottement  $\vec{F}$ .

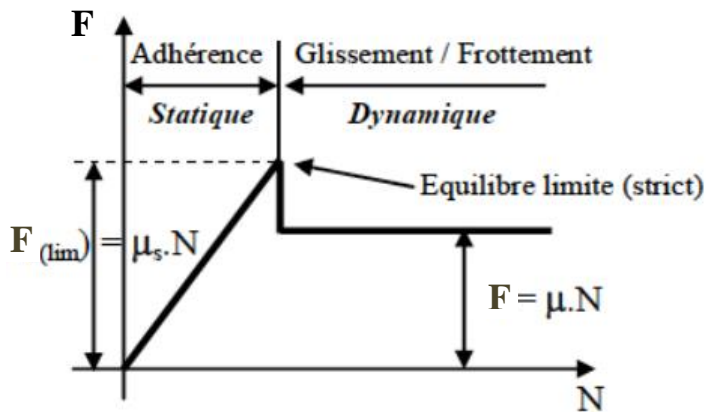
Ainsi s'il existe un effort normal  $\vec{N}$  qui met en contact les deux surfaces, l'effort tangentiel nécessaire pour induire ou provoquer un mouvement entre les deux corps est l'effort de frottement statique  $\vec{F}_{fS}$ .

Ensuite lorsque l'une des surfaces est en mouvement provoqué par une force motrice  $\vec{F}_m$ , il faut exercer, pour conserver ce mouvement un effort de frottement dynamique  $\vec{F}_{fD}$ , l'illustration de sur la figure 36.



**Figure 1. 36** (a) Bilan des forces de deux surfaces en contact en état statique ; (b) Bilan des forces de deux surfaces en contact en état dynamique.

On peut résumer le comportement de frottement par le graphique ci-dessous (Figure 1. 37), donnant la relation entre  $N$  (composante normale) et  $F$  (composante tangentielle) de la force de contact où on voit bien les deux phases de frottement.



**Figure 1. 37** Trace de force de frottement en fonction de la force motrice.

Les propriétés des matériaux ne sont pas l'unique facteur influent sur le frottement. La présence de liquide à l'interface peut changer le comportement des deux surfaces et la quantité du liquide peut diminuer ou augmenter le frottement.

Il existe principalement deux types de frottement : le frottement sec et le frottement humide, Comme son nom l'indique le frottement sec concerne des surfaces en contact sèches et est aussi appelé frottement de Coulomb. Le frottement humide décrit le frottement entre deux surfaces séparées par une couche liquide ou gazeuse.

L'effort de frottement statique est toujours supérieur ou égal à l'effort de frottement dynamique.

### 7.3.1 Le frottement sec

Leonard De Vinci (1499) fût le premier à étudier les questions de frottement. Deux siècles plus tard, Guillaume Amontons [87] reprendra les observations de Léonard de Vinci et énoncera la première relation mathématique du coefficient de frottement :

$$\mu = \frac{F}{N} \tag{I.17}$$

Avec  $\mu$ , le coefficient de frottement,  $F$ , l'effort de frottement,  $N$ , la charge normale appliquée. Néanmoins cette équation ne s'est pas avérée valable pour les matériaux viscoélastiques tels que les fibres et les produits fibreux [83]. L'équation I.18 donne un modèle qui s'adapte efficacement aux données  $F$  et  $N$  de ces matériaux.

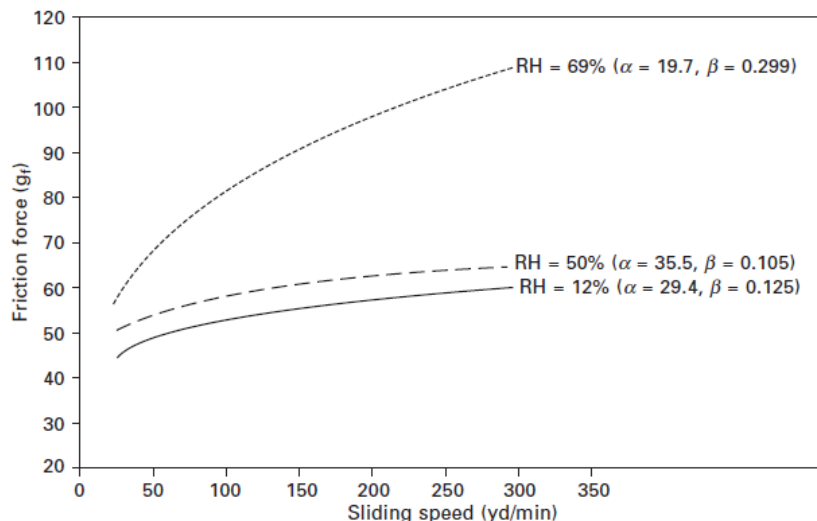
$$F = a N^n \quad (\text{I.18})$$

Dans cette équation,  $n$  est l'indice de friction et  $a$  est une constante qui devient égale à  $\mu$  lorsque  $n$  est égal à 1. Cette relation de puissance entre la résistance de friction ( $F$ ) et la charge normale ( $N$ ), avec les unités de force ou de contrainte, s'est avérée valable sur les matériaux fibreux et les assemblages textiles en général. De toute évidence, la constante de frottement  $a$  a les dimensions de (charge) $^{1-n}$ , de sorte que sa valeur dépendrait des unités de force ou de pression normale utilisées. Pour les matériaux polymères, la valeur de  $n$  se situe entre 0,67 et 1, soit les limites des déformations élastique et plastique, respectivement [88].

### 7.3.2 Le frottement humide

Dans la pratique, l'effet du mouillage sur le frottement peut être considéré dans trois ensembles différents de conditions de mouillage : glissement dans une atmosphère très humide, glissement dans un environnement détrempe, et glissement avec un lubrifiant, aqueux ou non aqueux, entraînés par l'énergie de surface [83].

Le glissement sous le premier conditionnement a été examiné par Schick [89]. La figure 1. 38 montre les résultats pour des fils de rayonne testés dans trois humidités relatives différentes. Ils indiquent que le frottement fibre-métal augmente avec une augmentation de l'humidité relative. Dans des conditions d'humidité faible à moyenne, l'augmentation du frottement avec l'humidité peut être largement attribuée au gonflement des fibres hydrophiles suite à l'absorption d'humidité. Il en résulte une augmentation de la surface réelle de contact et une augmentation correspondante de la friction.



**Figure 1. 38** Effet de l'humidité relative sur le frottement du fil de rayonne Frictionmètre Rothschild (RMS-60, tige chromée de diamètre 0,5 po, angle de contact 360) [89].

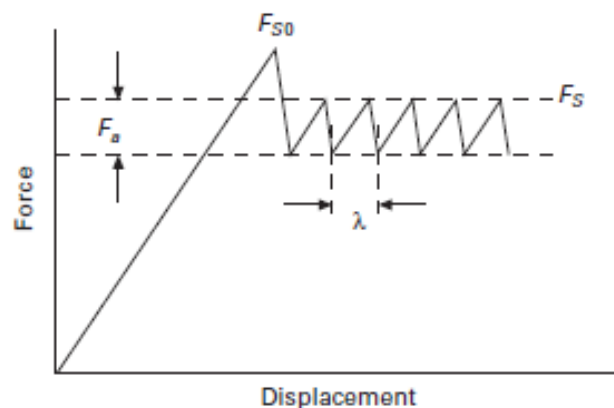
Sous une humidité relativement élevée, le comportement semble équivalent à celui donné par les conditions de lubrification hydrodynamique. Il est possible que la surface lisse et les couches d'eau absorbées soient à l'origine de ce comportement. Le deuxième ensemble de conditions représente celles qui sont rencontrées lorsque les surfaces glissent dans un état immergé ou dans un environnement détrempe.

### 7.3.3 Le phénomène de stick-slip

Il a été noté à plusieurs reprises qu'un tracé de la force de frottement en fonction du temps, pendant le glissement chez les matériaux textiles, reflète des fluctuations. Le premier pic enregistre généralement la force la plus élevée et correspond à la force de frottement statique. Une fois que le mouvement relatif commence, la trace obtenue oscille mais les variations cycliques peuvent être irrégulières. Le profil trouvé peut varier d'un matériau à l'autre, d'une méthode de mesure à l'autre et d'une morphologie à l'autre. L'environnement (fluide ou air, humidité relative et température) et les conditions d'essai (force normale, taille et nature du contact, et vitesse de glissement) influencent la trace.

Par conséquent, il est utile de caractériser le profil en fonction d'un certain nombre de paramètres dont les valeurs peuvent être utilisées pour comprendre et rationaliser plus en détail le comportement d'un matériau. Une courbe de frottement hypothétique est présentée dans la figure 1. 39.

Les paramètres suivants peuvent être utilisés pour caractériser sa nature.  $F_{S0}$  peut être appelée la force de frottement statique, ou la force au premier moment du glissement. Elle correspond au premier pic du profil et représente généralement la valeur la plus élevée de la force. Ensuite, la force oscille entre des pics (enregistrés à l'instant du glissement) et des creux (enregistrés à l'instant du collage), ceux-ci à des valeurs inférieures à  $F_{S0}$ . La moyenne des pics, à l'exception du premier, est la valeur statique, ou  $F_S$ . La valeur moyenne de la force, c'est-à-dire la valeur moyenne des pics et des creux, est considérée comme la valeur cinétique. Cette force sera égale à  $F_S - 0,5 F_a$ , [83] où  $F_a$  est l'amplitude des vibrations (à l'exclusion du premier pic).  $\lambda$  est la longueur d'onde moyenne des fluctuations.



**Figure 1. 39** Trace de frottement hypothétique pour un matériau textile [83].

Subjectivement, on peut décrire le phénomène de stick-slip comme étant le reflet de la rugosité du contact entre deux surfaces. Ce type de description peut être étayé par le fait que les figures de stick-slip sont souvent observées dans des conditions de lubrification limite et à de faibles vitesses de glissement.

Dans notre étude, nous nous limiterons à la détermination de la force de frottement statique vu l'irrégularité des amplitudes et des fluctuations de stick-slip.

Les propriétés de frottement des tissus sont importantes pour déterminer les degrés de rugosité, de lissage et autres caractéristiques de surface. Le frottement des tissus est un facteur important pour déterminer la résistance à l'abrasion, le rétrécissement et les propriétés esthétiques. Les propriétés de frottement des tissus sont sensibles aux variations de la teneur en fibres, des propriétés mécaniques du fil, de la structure du tissu, du type de traitements de finition utilisés dans chaque cas, ainsi qu'aux conditions et méthodes utilisées pendant les essais.

## Conclusion de l'étude bibliographique

Dans une première partie, cette étude bibliographique a révélé la structure des fibres de cellulose de l'échelle moléculaire à l'échelle macrostructurale. Nous nous sommes principalement intéressés aux fibres du lin et du coton. Il est apparu que ces fibres très hydrophiles sont susceptibles à l'humidité. Les fibres cellulosiques changent de caractéristiques physicochimiques tels que la densité, le réarrangement des chaînes cellulosiques surtout dans les zones amorphes dû aux interactions des molécules d'eau avec les groupes hydroxyles. Ces interactions conduisent à la déformation des surfaces de textile (froissement) et à la baisse de la Tg en présence de l'eau rendant le matériau plus maniable. Ainsi, les propriétés mécaniques à leur tour sont affectées une fois le matériau cellulosique est en contact avec l'eau. Les fibres du coton et du lin deviennent plus extensibles et plus résistantes à la rupture. Cette instabilité structurale est l'inconvénient majeur chez les étoffes à base de fibres cellulosiques qui peut réapparaître même après repassage sous le phénomène de relaxation. D'où, l'intérêt de notre étude de pouvoir identifier ce phénomène et essayer de simuler une modélisation mathématique représentante de cette relaxation.

En outre, ce chapitre nous a guidé à repérer le sous-développement des méthodes employées dans l'industrie pour évaluer le froissement des surfaces textiles. Comme on a aperçu l'absence des recherches dans la littérature sur le transfert thermique à travers l'étoffe induite par la semelle de fer à repasser qui peut être très intéressant pour quantifier et optimiser l'énergie exploitée lors du repassage. Il était évident pour ce projet qu'on développe une méthode objective et précise pour la quantification des froissements sur une surface textile et d'étudier, dans un second temps, le transfert thermique entre les deux faces du tissu.

Les différents procédés qui ont été mis en place pour la réalisation de la partie expérimentale de cette thèse seront bien décrits dans le deuxième chapitre Matériaux et méthodes.

# **CHAPITRE 2**

## **Matériaux et Méthodes**

## Table des matières

Introduction .....	58
1. Caractéristiques des tissus .....	58
2. Méthodes de détermination de la teneur en eau au sein des tissus.....	60
2.1 Séchage des éprouvettes dans l'étuve .....	60
2.2 Analyses de dessiccateur infrarouge .....	61
3. Caractérisation des propriétés thermiques des fibres cellulosiques .....	61
3.1 Détermination de la température de dégradation par analyse thermique gravimétrique ATG.....	61
3.2 Détermination de la Tg par calorimétrie différentielle à balayage (DSC).....	63
4. Evaluation objective des surfaces textiles .....	65
4.1 Préparation des échantillons .....	65
4.2 Evaluation objective des surfaces textiles .....	66
4.2.1 Traitement d'image .....	66
4.2.3 Évaluation par balayage 3D .....	68
4.2.3 Evaluation de coefficient de frottement sous l'effet de la chaleur de la semelle du fer .....	69
5. Etude de relaxation des tissus textiles après repassage .....	70
5.1 Evaluation optique du phénomène de relaxation .....	71
5.2 Essai de relaxation .....	72
6. Mesure de températures avec la caméra thermique.....	73
Conclusion .....	74

## Table des illustrations

<b>Figure 2. 1</b> Dessiccateur modèle IR35. ....	61
<b>Figure 2. 2</b> Représentation schématique d'une ATG ; le circuit de refroidissement a été omis [93]. .....	62
<b>Figure 2. 3</b> Chambre climatique. ....	63
<b>Figure 2. 4</b> Schéma représentatif d'une calorimétrie différentielle à balayage. ....	63
<b>Figure 2. 5</b> Un thermo-gramme montrant le décalage brusque de trace indiquant une transition vitreuse. ....	64
<b>Figure 2. 6</b> Génération du froissement par la méthode de cylindre creux.....	65
<b>Figure 2. 7</b> Système d'analyse d'images des tissus froissés et repassés. ....	66
<b>Figure 2. 8</b> Détails de Macro utilisée sur imageJ pour le traitement d'image. ....	67
<b>Figure 2. 9</b> Image d'une étoffe froissée sans filtre (A) et avec filtre (B). ....	67
<b>Figure 2. 10</b> Le scanner 3D ATOS composé d'une caméra stéréo et de 2 capteurs .....	68



<b>Figure 2. 11</b> Echantillon fixé sur un support avec une inclinaison de 80°.....	68
<b>Figure 2. 12</b> Schéma simplifié du système développé pour la mesure de coefficient de frottement de la semelle du fer contre un textile.....	70
<b>Figure 2. 13</b> Microscope optique Euromex.....	71
<b>Figure 2. 14</b> Dynamomètre MTS utilisé pour le test de relaxation et un schéma représentatif d'un échantillon de tissu en cours d'essai (déplacement fixé).....	72
<b>Figure 2. 15</b> Présentation schématique de manip de mesure de température de la deuxième face de tissu.....	73
<b>Figure 2. 16</b> Image de la caméra thermique avec les différents points de mesure.....	73

## Introduction

Ce chapitre représente un rapport technique concis dans lequel sera exposé le matériel que nous avons employé ainsi que les méthodes que nous avons développées et/ou mises au point pour réaliser ce projet de recherche.

On commencera ce chapitre par la présentation des caractéristiques des tissus employés pour les différentes études réalisées dans ce projet.

Ensuite on détaillera les deux méthodes utilisées pour analyser le comportement hygroscopique des tissus à base de fibres cellulosiques étudiées telles que : effet de température, cinétique de séchage et d'adsorption pour deux teneurs d'eau.

La partie suivante décrira les techniques de caractérisation des propriétés thermiques adoptées afin d'observer le rôle de la teneur en eau sur le comportement des matériaux cellulosiques à la dégradation à haute température ainsi que sur la température de transition vitreuse.

Plus tard, les différentes méthodes objectives d'évaluation des surfaces textiles seront évoquées. On détaillera dans un premier temps le processus de préparation et de pré-conditionnement reproductible des échantillons. Puis on divulguera les essais réalisés pour chaque type d'évaluation.

Avant de détailler l'essai de relaxation réalisé sur des tissus en coton et lin repassés, on exposera d'abord les méthodes optiques d'identification du phénomène de relaxation sur des échantillons repassés employés. Ensuite on énoncera le protocole de pré-conditionnement ainsi que l'essai de relaxation.

La dernière partie de ce chapitre portera sur la méthode de mesure des températures de surface de la semelle du fer à repasser ainsi que celle de tissu en coton. Ces mesures seront une clé non seulement pour la compréhension de la distribution de chaleur dans le cas de repassage mais aussi pour nous guider sur l'approche mathématique qui sera proposée dans le dernier chapitre de ce manuscrit.

### 1. Caractéristiques des tissus

Tout au long de ce projet de thèse, nous avons utilisé les mêmes tissus de lin et de coton (coton 2) pour toutes les manipulations expérimentales. Quant à l'étude hygroscopique et les propriétés thermiques on a intégré d'autres tissus mais toujours à base de fibres cellulosiques. Les étoffes ont été fournies par 'Center For Testmaterials BV' (Vlaardingen, Pays-Bas).

L'analyse des tissus a été réalisée au sein du laboratoire de métrologie du Laboratoire LPMT. Pour tous les tests, la moyenne, l'écart type ainsi que le coefficient de variance ont été calculés.

- **Titre** : Le titre d'un fil, appelé aussi la masse linéique, est défini selon la norme NF G07-316 [90], par le rapport de la masse de l'éprouvette conditionnée dans les conditions standards ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR}\% = 65 \pm 2\%$ ) par la longueur de celle-ci (Equation II.1).

$$T = 1000 \times (M/L) \quad (\text{II.1})$$

T représente le titre exprimé en Tex, M est la masse de l'éprouvette en grammes et L est la longueur du fil en mètres. La pesée des fils extraits de tissu a été réalisée en utilisant une balance de haute précision (0.01 mg) METTLER-TOLEDO AE-240 et la longueur est mesurée grâce au maillemètre pour les fils de chaîne et de trame. Dix éprouvettes ont été testées pour chaque type de fil.

- **Masse surfacique** : La masse surfacique d'une étoffe est déterminée en suivant la norme NF EN 12127 [91] dans les conditions standards ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR}\% = 65 \pm 2\%$ ). Des échantillons, de forme circulaire, d'une surface de 100 cm<sup>2</sup>, ont été découpés d'une manière à éviter les parties froissées et de s'éloigner des lisières d'une distance supérieure ou égale à 15 cm. Les échantillons ont été pesés et la masse surfacique a été calculée selon la formule II.2.

$$Ms = 10000 \times m / A \quad (\text{II.2})$$

Ms représente la masse surfacique qui est égale au rapport de la masse de l'échantillon conditionné, m, en grammes par sa surface, A, en centimètres carrés. Ms est exprimée en grammes par mètre carré. Dix essais ont également été effectués pour ce test.

- **Epaisseur** : Selon la norme ISO 5084 [92], et dans les conditions standards ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR}\% = 65 \pm 2\%$ ), l'épaisseur d'une éprouvette est mesurée comme la distance entre la plaque de référence sur laquelle repose l'échantillon et un pied presseur circulaire parallèle qui exerce une pression spécifiée sur la surface du textile testé. Ici, les échantillons qui ont été découpés pour la mesure de masse surfacique ont été récupérés pour déterminer l'épaisseur par le testeur de compression KES-FB3 avec une surface de pression de 2 cm<sup>2</sup> et une pression de 5 gf/cm<sup>2</sup> (0,5 kPa). Le résultat est exprimé en mm.

Dans le tableau ci-dessous (tableau), on présente les différentes caractéristiques de nos tissus analysés selon les normes appliquées :

**Tableau 1: Caractéristiques des tissus à base de fibres cellulosiques utilisés**

Tissu	Norme	Coton1	Coton2	Coton3	Coton/PET	Lin
Matière		Coton 100%	Coton 100%	Coton 100%	Coton 30% PET 60%	Lin 100%
Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> )	NF EN 12127	170 ± 4	190 ± 4	340 ± 5	170 ± 3	275 ± 5
Épaisseur (mm)	ISO 5084	0,25 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0,5 ± 0.02	0,25± 0.01	0,6 ± 0.02
Compte chaîne/1cm	ISO 7211/2	54	48	50	54	28
Duitage/ 1cm		42	46	40	44	20
Titre de fil de chaîne (Tex)	NF G07-316	35	37	57	35	104 Tex
Titre de fil de trame (Tex)		38	38	111	38	119 Tex
Armure	NF G 00-001	Toile	Toile	Sergé 3/1 sens chaîne	Toile	Toile
Traitement		Blanchit	Brut	Teint en soufre	Brut	Brut

## 2. Méthodes de détermination de la teneur en eau au sein des tissus

### 2.1 Séchage des éprouvettes dans l'étuve

La teneur en eau d'un matériau correspond à la masse d'eau d'un échantillon ramenée à la masse sèche. Elle s'exprime en pourcent et il s'agit d'une teneur en eau pondérale. La mesure s'effectue par séchage conventionnellement par évaporation de l'eau dite libre du matériau. Pour cette méthode, on a opté pour deux températures de séchage : séchage doux à 45°C pendant 48 h et un séchage à 100°C pendant 48 h. La teneur en eau (Te) est calculée selon l'équation suivante :

$$Te(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{II.3})$$

Avec  $M_h$ : la masse initiale de l'échantillon humide, conditionné dans les conditions standards ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR}\% = 65 \pm 2\%$ )

$M_s$  : la masse sèche de l'échantillon obtenue après un étuvage.

On note que juste après étuvage, les éprouvettes ont été mises dans des tubes à essai hermétiques pour qu'elles ne reprennent pas d'humidité afin d'avoir une mesure précise de masse sèche.

## 2.2 Analyses de dessiccateur infrarouge

Le dessiccateur infrarouge, figure 2. 1, permet de mesurer la masse d'échantillon en cours temps lors de séchage par l'association d'une balance interne de précision 1 mg et d'un sécheur infrarouge (plage de température 40 – 160 °C). Ainsi on peut apercevoir la cinétique de séchage et le plateau maximale de perte en masse signifiant l'atteinte de la masse sèche optimale. Le choix de température de séchage pour nos deux lots des échantillons était comme suit :

- 40°C pour le lot des échantillons conditionnés à un RH de 65% pour pouvoir sécher les échantillons avec la température la plus basse possible afin de simuler l'effet de séchage à l'air libre.
- 100°C pour le deuxième lot des échantillons saturés en eau (trempés dans l'eau pendant 30 minutes et ensuite foulardés avec un taux d'exprimage de 40%) afin d'accélérer l'opération de séchage.



Figure 2. 1 Dessiccateur modèle IR35.

La détermination de la perte en masse en eau au cours du temps est calculée selon l'équation suivante :

$$Perte\ de\ masse\ en\ eau(t)(\%) = \frac{M_t - M_s}{M_s} \quad (II.4)$$

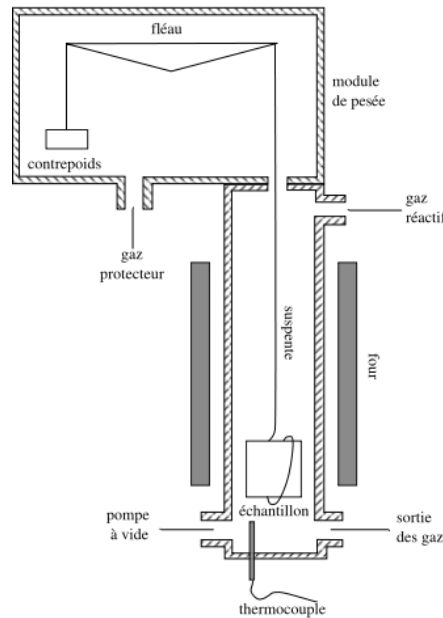
Avec  $M_t$ : la masse de l'échantillon à un temps donné.

## 3. Caractérisation des propriétés thermiques des fibres cellulosiques

### 3.1 Détermination de la température de dégradation par analyse thermique gravimétrique ATG

L'ATG est une technique mesurant la variation de masse d'un échantillon lorsqu'il est soumis à une programmation de température, sous atmosphère contrôlée. Cette variation de masse peut être une perte de masse (émission de vapeurs) ou gain de masse (fixation de gaz).

Une telle analyse suppose une bonne précision pour les trois mesures : masse, temps et température. Comme les courbes de variations de masse sont souvent similaires, il faut souvent réaliser des traitements de ces courbes afin de pouvoir les interpréter. La dérivée de ces courbes montre à quels points ces variations sont les plus importantes.



**Figure 2. 2** Représentation schématique d'une ATG ; le circuit de refroidissement a été omis [93].

Dans le cadre de cette analyse, nous avons effectué un parcours de chauffage avec une rampe de 10 °C/min à 600 °C à partir de la température ambiante sous atmosphère inerte (diazote). Avant analyse thermogravimétrique, huit échantillons ont été prélevés de 4 tissus (2 par tissu : coton1, coton2, coton/PET et lin) et ensuite conditionnés dans une chambre climatique (figure 3). Le conditionnement a été réalisé sous deux atmosphères avec deux taux d'humidité relative différents.

Le premier lot d'échantillons a été conditionné à une atmosphère avec un taux d'humidité relative de 20% pendant 24 heures. Quant au deuxième lot le taux d'humidité relative était de 50% pendant 24 h.

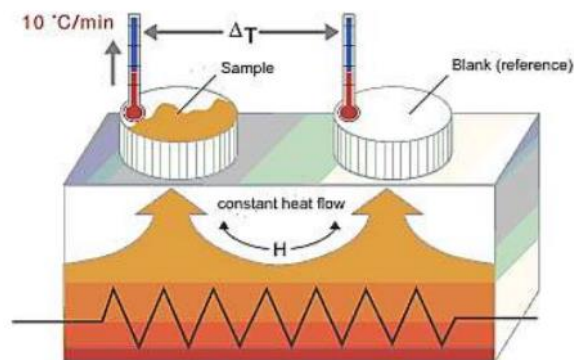
En fonction de la teneur en eau au sein d'échantillon, on pourra voir l'effet de l'humidité sur le comportement et la dégradation des fibres cellulosiques ou mélange sous hautes températures.



**Figure 2. 3** Chambre climatique.

### 3.2 Détermination de la Tg par calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

La calorimétrie différentielle à balayage (Differential Scanning Calorimetry, DSC) est une technique permettant de caractériser l'organisation macromoléculaire et observer les modifications structurales des matériaux sous l'effet de la température. Une cristallisation ou une fusion du polymère se manifeste par un échange d'énergie avec le milieu extérieur (respectivement par libération ou absorption d'énergie). Quant à la transition vitreuse, elle se traduit par un changement et plus précisément une augmentation de capacité de chaleur. L'énergie échangée modifie alors la température de l'échantillon par rapport au milieu, avec lequel il serait en équilibre, en absence du changement subi. Afin de mesurer ces échanges énergétiques, la DSC mesure la température de l'échantillon et celle d'une référence dont le comportement en fonction de la température est connu. Pour cela, la DSC est constituée d'un bloc calorimétrique à température contrôlée dans lequel sont placées deux capsules, une contenant l'échantillon, de masse connue, et l'autre la référence. Les deux capsules sont disposées sur une plaque mince qui assure une conductance thermique radiale vers le bloc (Figure 2. 4).



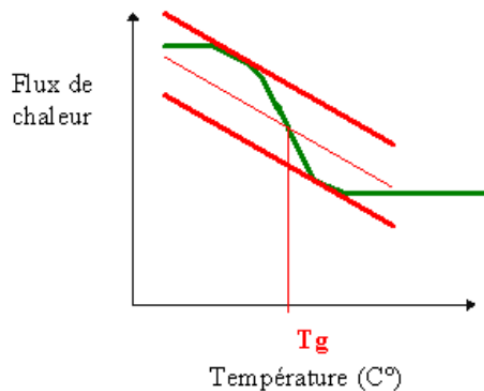
**Figure 2. 4** Schéma représentatif d'une calorimétrie différentielle à balayage.

Lors de l'essai, un gaz de balayage, réactif ou neutre, est diffusé dans l'enceinte pour assurer le transfert thermique entre le système de chauffe et les têtes de mesure. Dans notre cas, nous utilisons un gaz neutre qui est l'azote.

Pour l'analyse de nos échantillons, la DSC Q20 de marque TA Instruments a été utilisée pour déterminer la température de transition vitreuse. Les essais ont été réalisés sur une plage de température variant entre  $-50$  et  $150^{\circ}\text{C}$  à une vitesse de chauffe de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ensuite un deuxième cycle entre  $-50$  et  $300^{\circ}\text{C}$  avec la même vitesse de chauffe. Les échantillons ont été préalablement conditionnés à  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}\% = 65 \pm 2\%$  et ensuite pesés à des masses ne dépassant pas  $5$  mg. Ils ont ensuite été renfermés dans les capsules en aluminium, que nous avons trouées pour éviter tout éclatement, engendré par un dégagement gazeux. Avant tout essai, l'appareil a été calibré pour la plage de température nécessaire.

Un logiciel d'analyse TA Universal Analysis, associé à la DSC, permet de nous fournir les résultats de l'essai en traçant le thermogramme du flux de chaleur ( $\text{W.g}^{-1}$ ) en fonction de la température  $T$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ). Chaque essai est caractérisé par la masse de l'échantillon et le cycle thermique choisi.

Nous pouvons déterminer la température de transition vitreuse, notée  $T_g$ , par le tracé des tangentes à la courbe sur laquelle on note une diminution brusque du flux de chaleur (figure 2. 5). La transition vitreuse définit le passage de la matière d'un état vitreux cassant à un état caoutchouteux souple. Elle caractérise ainsi la phase amorphe du polymère et des mouvements des segments de chaînes macromoléculaires situées dans cette zone. Plus la température vitreuse est importante, plus la mobilité de ces liaisons est réduite et le matériau est rigide. Ce paramètre nous sert d'indicateur de flexibilité du matériau utilisé.



**Figure 2. 5** Un thermo-gramme montrant le décalage brusque de trace indiquant une transition vitreuse.

Les propriétés physico-chimiques nous permettent d'observer les modifications macromoléculaires engendrées par l'absorption de l'eau par les fibres cellulosiques. Ce paramètre structural est fortement corrélé avec les propriétés mécaniques des matériaux.



## 4. Evaluation objective des surfaces textiles

### 4.1 Préparation des échantillons

Tout au long de nos expériences nous avons eu recours à des méthodes de manipulation bien précise afin de reproduire les différentes étapes de préparation : lavage, froissage et repassage de la même manière pour les différentes éprouvettes des tissus utilisés.

Pour cette partie d'étude seulement les tissus de lin et de coton qui sont utilisés. Les éprouvettes sont découpées d'une dimension de 30×30 cm et surfilées sur les bords pour éviter l'effilochage de tissu.

- **Lavage** : comme première étape on effectue un lavage pour toutes les éprouvettes pour éliminer des froissements déjà présents sur les tissus et remettre tous les échantillons au même état de départ. La machine de lavage utilisée est à chargement frontal. Le programme de cycle sélectionné est celui de coton 60°C avec une quantité de détergent de 10 g.
- **Génération du froissement** : à la sortie de lavage on laisse les échantillons se sécher à l'air libre et à plat pendant 24 h dans les conditions standards ( $T=20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR}\% = 65 \pm 2\%$ ). Ensuite, on effectue le froissement de chaque éprouvette par la méthode de cylindre creux suivant la norme NF G 07-125 : on étale le tissu sur la plateforme puis on place le cylindre creux au-dessus de l'étoffe. Ensuite on vient pousser la tige métallique, située sur l'axe de cylindre, de bas vers le haut pour tirer la partie de tissu qui sera froissée. Enfin, on pose le contrepoids (700g) au milieu de cylindre qui va exercer une pression sur le tissu engendrant par la suite des froissements reproductibles. Ces différentes étapes sont démontrées sur la figure 2. 6.



Figure 2. 6 Génération du froissement par la méthode de cylindre creux.

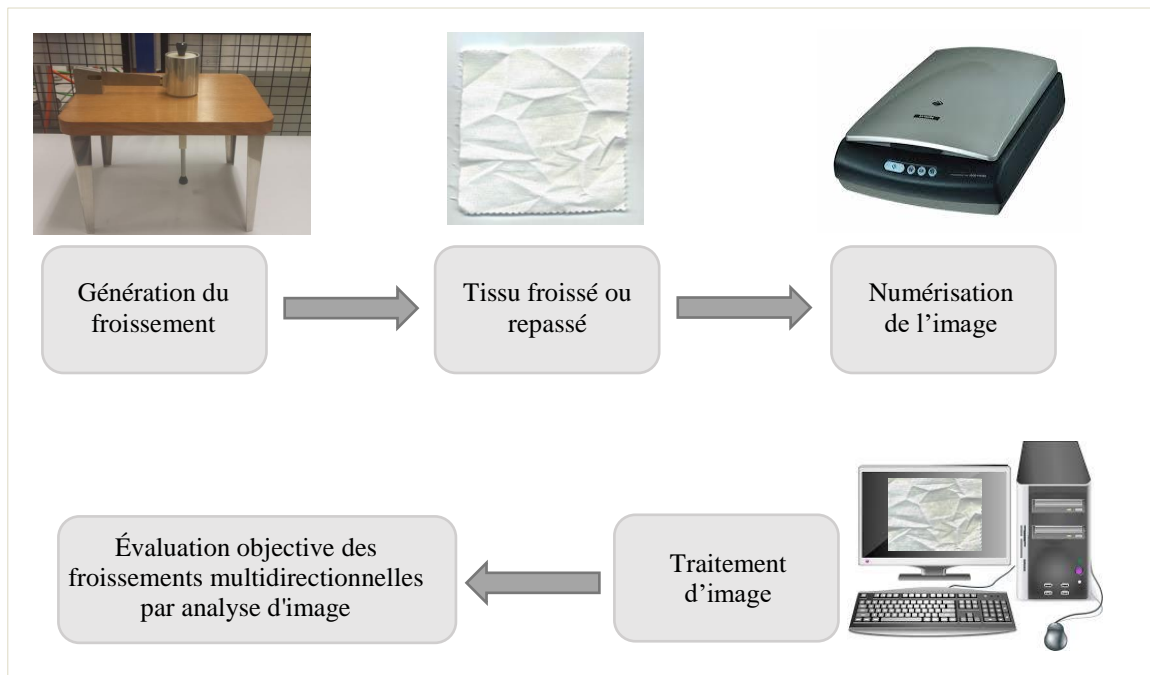
Dans le cas où on doit humidifier le tissu avant repassage, nous appliquons l'humidité en pulvérisant un brouillard homogène sur le tissu avant de le froisser. Pour contrôler la quantité d'eau pulvérisé, on pèse l'échantillon en cours d'humidification jusqu'à arriver à une masse d'eau rajoutée de 40% de la masse d'échantillon sec.

- **Repassage :** Le central vapeur utilisé est celui de la marque PHILIPS modèle GC9622/20. Le repassage a été réalisé manuellement et toujours par la même personne pour avoir plus ou moins la même application de pression et de vitesse. Également le processus de repassage est toujours effectué dans le même sens : en commençant par le coin supérieur droit du carré et dans le sens des aiguilles d'une montre pour 5 coups.

## 4.2 Evaluation objective des surfaces textiles

### 4.2.1 Traitement d'image

Le système expérimental d'analyse d'images, représenté par la figure 2. 7, est développé pour l'évaluation objective de taux de froissement. Il est composé par un cylindre creux générant un froissement multidirectionnel, d'un scanner Epson 2400 photos (avec une résolution optique maximale de 20,400x28080 pixels à 2400 dpi) pour l'acquisition des images et d'un ordinateur pour l'enregistrement et le traitement des données.



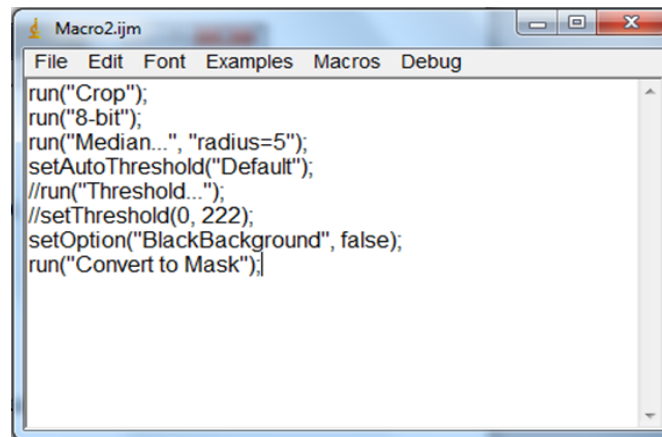
**Figure 2. 7** Système d'analyse d'images des tissus froissés et repassés.

Après le froissement de l'échantillon, selon les étapes décrites précédemment dans la partie préparations des échantillons, nous appliquerons l'analyse d'image qui consiste à : numériser le tissu froissé par avec le scanner. Ensuite et grâce à une macro créée sur imagJ, figure 2. 8, on traite l'image acquise. Cette macro permet de ronger l'image dans un premier temps pour éliminer les zones qui ne seront pas étudiées par l'application de la commande Image/Crop.

Il convient ensuite de convertir l'image en niveau de gris à l'aide de la commande Image/Type/8-bit.

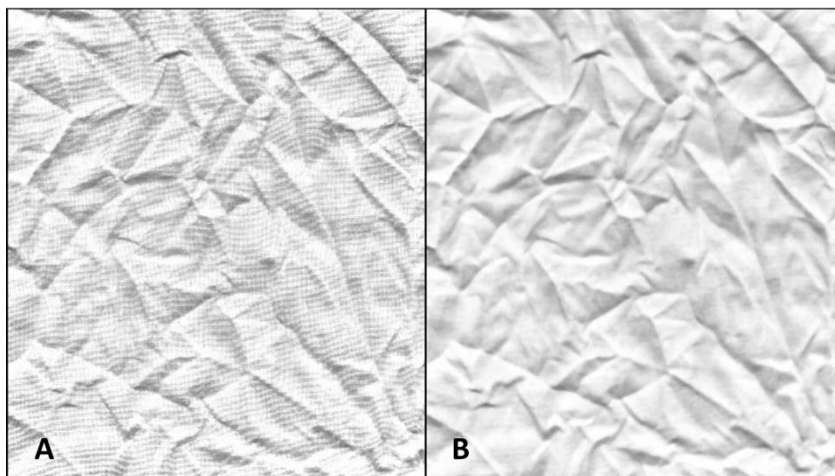
À partir de là, l'objectif des prochaines étapes consiste à obtenir le contraste le plus important possible entre les zones où le tissu ne présente pas de froissements (le fond) et les zones froissées. Pour se faire, il faut tout d'abord binariser l'image avec les commandes Image/Adjust/Threshold. Afin de mettre en évidence les froissements et de masquer le contraste entre les fils de chaîne et les fils de trames, il est possible d'appliquer un filtre avant l'étape de binarisation, figure 2.9. Dans cette étude, le filtre retenu est celui obtenu à l'aide des commandes Process/Filter/Median, étendu sur 5 pixels. Les taux de froissements présentés dans la suite de ce travail, sont obtenus en relevant le taux de zones noires dans la fenêtre Threshold.

Cette procédure de traitement d'image est reproduite de la même façon pour les tissus après repassage. Vu qu'après repassages les zones de froissement sont moins visibles, une petite modification est apportée sur le traitement d'image au niveau de contraste et du filtre.



```
Macro2.ijm
File Edit Font Examples Macros Debug
run("Crop");
run("8-bit");
run("Median...", "radius=5");
setAutoThreshold("Default");
//run("Threshold...");
//setThreshold(0, 222);
setOption("BlackBackground", false);
run("Convert to Mask");
```

**Figure 2. 8** Détails de Macro utilisée sur imageJ pour le traitement d'image.



**Figure 2. 9** Image d'une étoffe froissée sans filtre (A) et avec filtre (B).

### 4.2.3 Évaluation par balayage 3D

Pour cette méthode, nous avons utilisé un scanner 3D ATOS Compact, figure 2. 10, intégrant une configuration de caméra stéréo, associée à la technologie de lumière bleue, rendant le processus de numérisation indépendant des conditions de lumière ambiante.

Pour analyser les données numérisées, nous avons employé le logiciel GOM Inspect pour calculer la rugosité et le volume de plis ou de froissement du tissu numérisé. GOM Inspect est un logiciel d'analyse des formes et des dimensions, d'inspection 3D et de traitement des maillages pour les nuages de points 3D et les ensembles de données CAO provenant de scanners à projection de franges ou de scanners laser, de machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) et d'autres systèmes de mesure.



**Figure 2. 10** Le scanner 3D ATOS composé d'une caméra stéréo et de 2 capteurs



**Figure 2. 11** Echantillon fixé sur un support avec une inclinaison de 80°.

Tout comme la préparation des échantillons pour la méthode de traitement d'image, nous effectuons les mêmes étapes : lavage, génération du froissement et repassage en respectant toujours les mêmes conditions. Ensuite, on fixe l'échantillon à scanner sur un support incliné de 80° comme montré sur la figure 2. 11.

Un premier balayage est effectué sur échantillon froissé pour quantifier le froissement avant le repassage. Puis on refait un deuxième balayage par le scanner 3D sur le même échantillon après repassage.

Le processus de repassage a été appliqué comme décrit précédemment dans la section de préparation des échantillons. Dans la partie d'évaluation de froissement par scan 3D présentée dans le chapitre 3 pour étudier l'optimisation de repassage, le repassage est effectué selon deux modes : repassage sans vapeur et avec vapeur de débit 125 g/min. Un deuxième scan est effectué juste après le repassage, suivi d'un troisième et dernier scan 24 heures après le repassage.

Les données obtenues ont été analysées avec le logiciel GOM Inspect pour calculer la rugosité et le volume de froissement du tissu scanné en utilisant les équations suivantes inspirées des travaux de J. Fan et al. [94] et de R. Zaouali et al [95]:

$$R_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (\text{II.5})$$

Où  $R_z$  est le rapport de rugosité de surface,  $z_i$  est la  $i$ ème hauteur d'une direction X dans une coordonnée du plan XY et n est le nombre total de pixels. Chaque pixel représente une zone réelle d'une surface balayée de 1 mm<sup>2</sup>.

$$V_z = \sum_{i=0}^n |z_i| \quad (\text{II.6})$$

Où  $V_z$  est le volume des froissements en mm<sup>3</sup>.

### 4.2.3 Evaluation de coefficient de frottement sous l'effet de la chaleur de la semelle du fer

Le repassage consiste à poser la semelle du fer à repasser sur le textile et à la faire glisser ensuite sur le tissu. Pour pouvoir mesurer le coefficient de frottement de textile en contact avec la semelle dans le cas de repassage, on a eu recours à un dispositif qui prélève les valeurs de force nécessaire pour faire glisser le fer à repasser sur l'étoffe.

En regard de cette définition, il est possible de distinguer trois paramètres variables liés à l'utilisation du système de mesure : la température de la semelle, la force de pression et la vitesse de passage. Cependant pour pouvoir étudier les résultats de repassage sur le textile et rendre l'opération de repassage reproductible, il est nécessaire de contrôler tous ces paramètres. Un central vapeur instrumenté permettant de faire varier et de contrôler ces trois paramètres a été conçu. Nous allons détailler les solutions technologiques utilisées pour répondre à chaque paramètre.

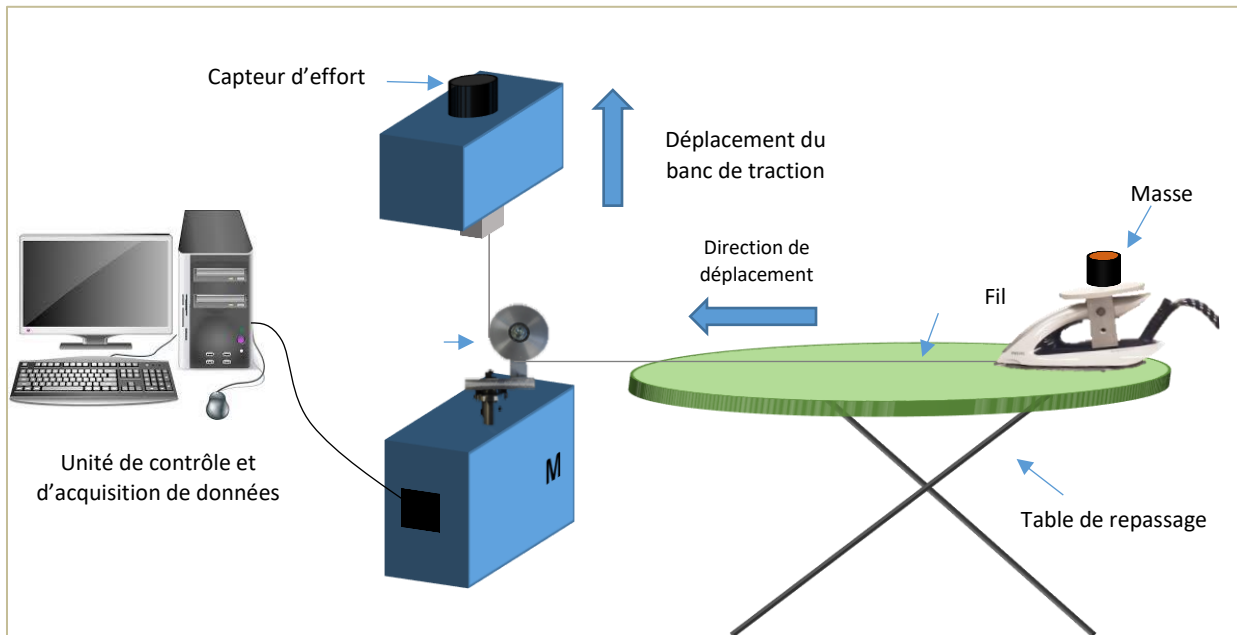
Le tribomètre ou le central vapeur instrumenté conçu se compose de quatre systèmes principaux :

- le central vapeur avec la semelle chauffante dont la température est mesurée par un thermomètre infrarouge. Les températures choisies pour notre essai expérimental sont : 20, 140, 160 et 180°C. Il est à noter que le modèle du centrale vapeur Philips fourni
- pour l'étude ne permet pas de contrôler la température d'où l'utilisation d'un autre centrale vapeur avec température réglable.
- un système de masse posé au-dessus d'un support fixé sur le fer à repasser pour appliquer la charge souhaitée. Les charges employées pour cette étude sont de 1 Kg et de 2 Kg rajoutées à la masse du fer à repasser qui est de 350 g.
- un capteurs d'effort, intégré dans la machine de traction MTS et relié au central vapeur par un fil métallique qui mesure au cours de l'essai les efforts tangentiels. Le fil métallique est dévié par une poulie en aluminium pour transmettre le déplacement vertical de banc de traction en un déplacement horizontal du central vapeur contre le textile.

- un ordinateur relié à la machine MTS qui assure l'acquisition des données et le contrôle des paramètres d'essai. Pour cette étude on a choisi une vitesse de déplacement de 500 mm/min et un capteur de force de 100 N.

L'ensemble du système de mesure de coefficient de frottement de la semelle du fer à repasser contre le tissu est récapitulé sur le schéma illustré sur la figure 2. 12.

On souligne ici qu'on a employé un repassage sans vapeur pour atténuer le phénomène de stick-slip expliqué dans la partie de bibliographie.



**Figure 2. 12** Schéma simplifié du système développé pour la mesure de coefficient de frottement de la semelle du fer contre un textile.

Il est à noter que pour ce procédé on mesure que le coefficient de frottement instantané ou statique déterminé selon la méthode suivante : On mesure la force d'adhésion statique pour chaque force normale appliquée à une température donnée. En tout, on aura trois points alignés. Le coefficient directeur de la droite passant par ces trois points est notre coefficient de frottement statique.

## 5. Etude de relaxation des tissus textiles après repassage

L'état d'un textile repassé n'est pas un état de repos. En effet le repassage consiste à appliquer des contraintes mécanique, thermique et physique à la fois. Donc au bout d'un certain temps ces contraintes tendent à se dissiper et le matériau récupérera son état de repos.

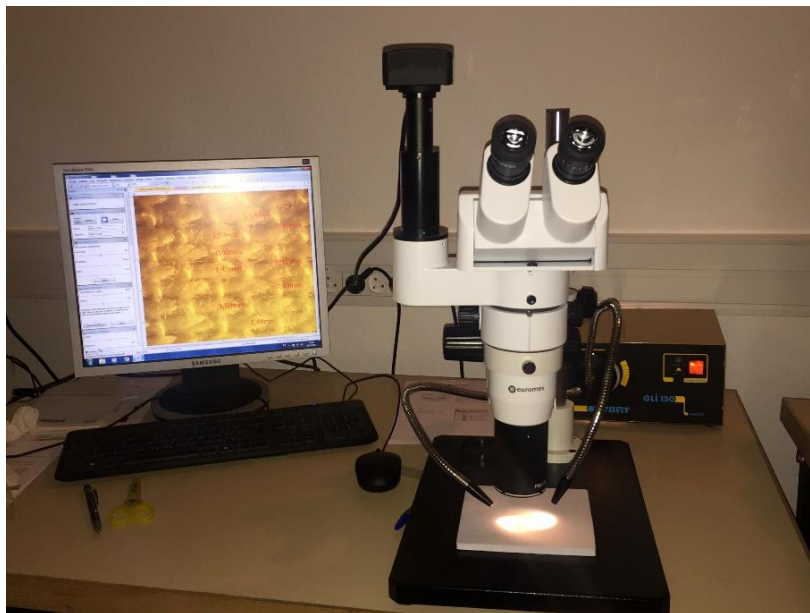
Afin d'observer et identifier ce comportement de retour à un état plus stable, on a eu recours à des méthodes optiques dans un premier lieu ensuite on a employé des essais de relaxation pour évaluer de plus près et en temps réel le phénomène de relaxation.



### 5.1 Evaluation optique du phénomène de relaxation

Pour l'évaluation optique, on a commencé tout d'abord par l'utilisation d'un microscope numérique Euromex, figure 2. 13, avec un grossissement de  $\times 20$  pour observer l'évolution des dimensions du tissu dans le temps dans le sens chaîne et le sens de la trame. Trois échantillons ont été préparés pour chaque tissu (lin et coton 2) de dimensions  $5 \times 5$  cm. Pour appliquer le plus de contrainte possible, on a pratiqué un repassage avec vapeur avec une température approximative de  $190^\circ\text{C}$ . Le repassage a été appliqué d'une façon reproductible pour tous les échantillons.

Une première photo a été prise avec le microscope quelques secondes après le repassage. Sur l'image acquise on mesure la distance en  $\mu\text{m}$  entre deux marques dans chaque direction de fil. La même action a été répétée après 24 heures sans déplacer l'échantillon dans des conditions standards ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR}\% = 65 \pm 2\%$ ). Cette méthode, cependant, ne permet pas d'observer le froissement en raison de la petite taille de l'échantillon.



**Figure 2. 13** Microscope optique Euromex.

Afin d'évaluer le phénomène de relaxation sur plus grande échelle, nous avons employé l'évaluation par balayage 3D avec le scanner 3D ATOS.

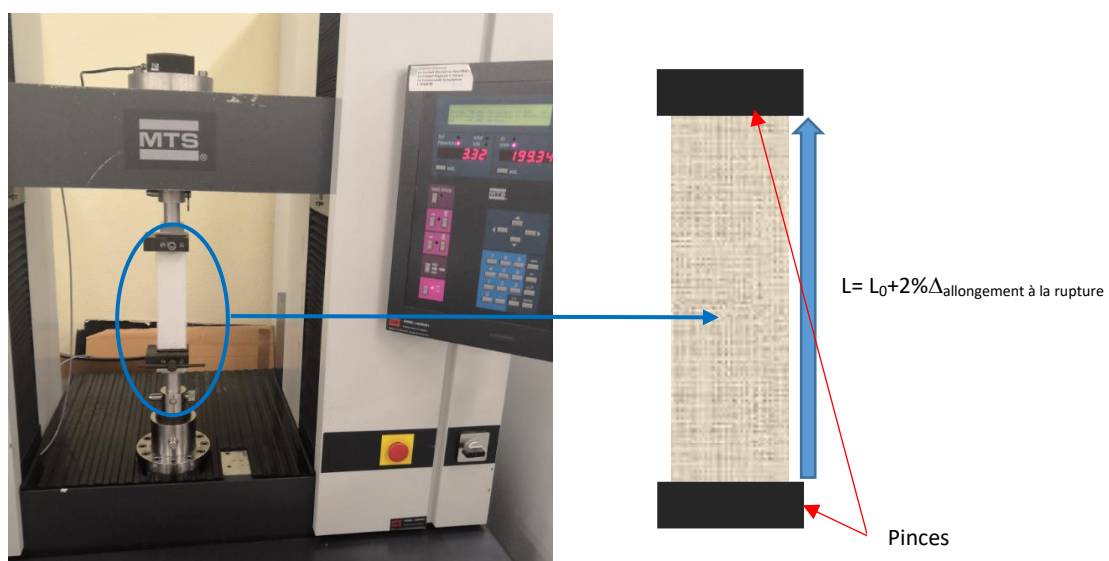
Tout comme la partie d'évaluation de repassage expliqué précédemment, on applique le même processus et même échantillonnage. Toutefois, un nouveau mode de repassage a été rajouté pour avoir plus de variation de contrainte. Le repassage est donc employé selon trois modes : repassage sans vapeur, repassage avec débit de vapeur  $V_1 = 125\text{g/min}$  et repassage avec débit de vapeur  $V_2 = 150\text{g/min}$ . Trois échantillons ont été utilisés pour chaque mode de repassage. Les scans sont effectués avant repassage, juste après repassage et enfin u dernier scan 24 h post repassage dans le but de laisser assez de temps pour le retour à l'état de repos de chaque échantillon.

## 5.2 Essai de relaxation

En ce qui concerne la méthode d'essai de relaxation, les échantillons ont été préparés selon la norme EN ISO 13934-1 [97] avec une largeur et une longueur respectivement de 5 et 30 cm. L'expérience de base de relaxation par contrainte viscoélastique consistait à insérer l'échantillon entre deux pinces plates, puis à appliquer une vitesse de traction constante jusqu'à ce qu'un allongement final prédéfini soit atteint :  $\Delta_{\text{allongement à la rupture}}=2\%$ , tout en restant dans la zone élastique de déformation. À ce stade, les deux pinces sont maintenues bloquées dans leurs positions respectives, donc une déformation constante tout le long d'essai [96], pendant une période de temps prédéterminée : 1 heure. Pendant cette période, le matériau subit une relaxation viscoélastique des contraintes, la charge de traction diminuant d'abord rapidement à partir de sa valeur maximale au début de la relaxation des contraintes, puis plus progressivement. Si un intervalle de temps suffisamment long est accordé, on peut constater que la charge atteint finalement un plateau d'état stable ou une valeur à long terme.

La présente étude expérimentale a été réalisée sur la machine de traction MTS 20/M qui est contrôlée par le logiciel Testworks (programme principal MTS version 4.0) dans les conditions standards ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR}\% = 65 \pm 2\%$ ). La capacité du capteur de force utilisé est de 100 N avec une précision de charge de 0,01 % / 0,01N. Une vitesse constante de 500 mm/min a été appliquée. Les échantillons à tester ont été pré-conditionnés en deux lots différents pour chaque tissu (lin et coton 2) après lavage et séchage : un premier lot repassé à sec et un deuxième lot repassé à la vapeur. L'application du repassage a été reproductible et uniforme en appliquant 5 coups dans le sens de la longueur de l'échantillon. Un nouvel échantillon non testé a été utilisé pour chaque test, avec un total de trois échantillons pour chaque lot.

Le but ou le résultat final voulu de l'essai de relaxation est que nous obtiendrons le temps de relaxation qui reflète le temps nécessaire à un tissu ou à une fibre pour retrouver son état de repos. Dans notre cas, nous étudierons le phénomène de relaxation sur un tissu en lin pour voir après combien de temps il retrouvera son état de repos qui peut être accompagné de la réapparition de quelques plis sur la surface du tissu.

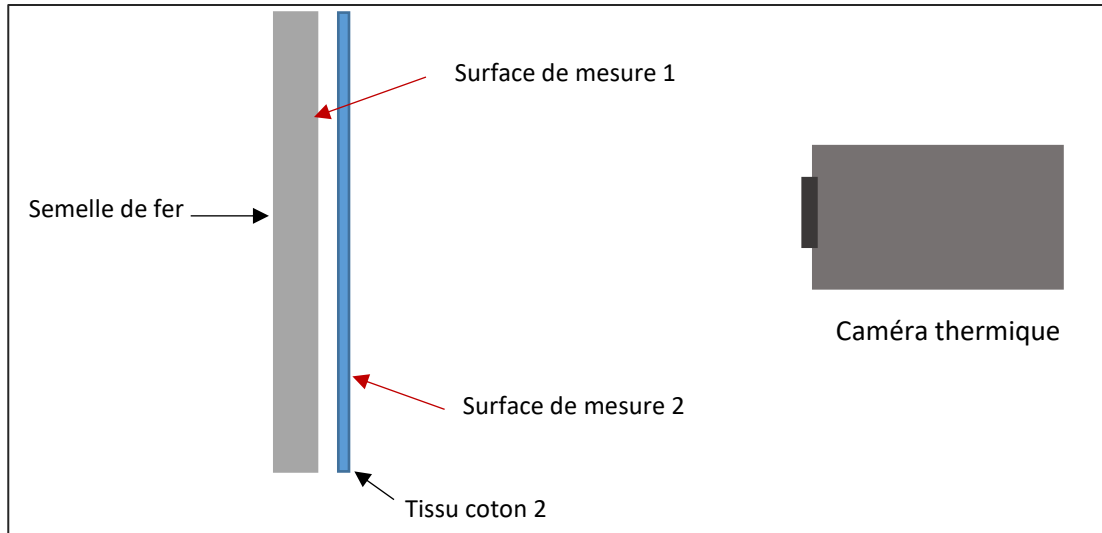


**Figure 2. 14** Dynamomètre MTS utilisé pour le test de relaxation et un schéma représentatif d'un échantillon de tissu en cours d'essai (déplacement fixé).



## 6. Mesure de températures avec la caméra thermique

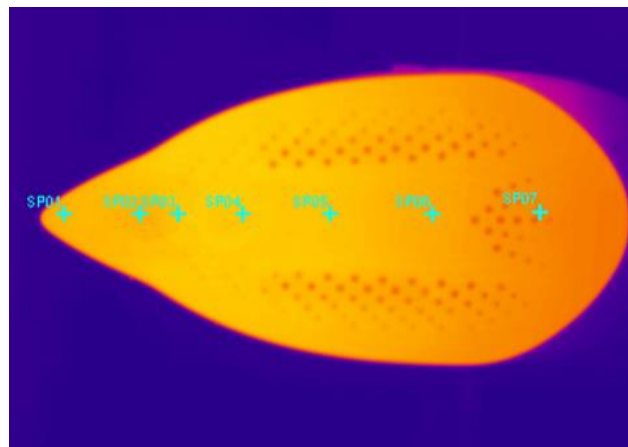
Il est à noter que le mode de transfert thermique est le paramètre pertinent dans l'opération de repassage. D'où la détermination de la température des interfaces des matériaux dans le cas de repassage est indispensable afin de comprendre au mieux la distribution de chaleur émise par la semelle et ensuite transférée à l'étoffe textile.



**Figure 2. 15** Présentation schématique de manip de mesure de température de la deuxième face de tissu.

Dans cette manipulation et grâce à une caméra thermique FLIR SYSTEMS (ThermaCAM SC3000 PAL) on a mesuré la température de la surface de la semelle de centrale vapeur dans différents points. Les mesures ont été prélevées dès la mise en marche de centrale vapeur mais sans déclencher la vapeur pour éviter la perturbation des mesures et jusqu'à la fin du cycle de chauffe (mise en veille). Puis on a plaqué un tissu de coton 2 contre la semelle du fer et on a ensuite prélevé les températures dans les mêmes points. Un schéma simplifié de la manipulation est illustré sur la figure 2. 15.

Le choix de points de mesures était effectué sur le long d'une droite au milieu de la semelle pour mesurer la température de différentes zones. Dans la figure 2. 16, on observe la disposition de points de mesure.



**Figure 2. 16** Image de la caméra thermique avec les différents points de mesure.

## **Conclusion**

A travers ce chapitre, nous avons détaillé les caractéristiques des tissus utilisés. En outre nous avons présenté les protocoles de différentes méthodes employées pour analyser certaines caractéristiques intrinsèques et d'état de surface qui seront utiles pour notre étude.

Les résultats obtenus suite à la mise en pratique de toutes ces techniques seront illustrés et analysés dans les deux chapitres suivants. Par la suite un modèle rhéologique sera développé à partir de résultats de l'essai de relaxation ce qui nous permettra de prévoir et évaluer la relaxation des tissus repassés. Ainsi un autre modèle de transfert de chaleur dans le cas de repassage sera proposé grâce aux données obtenues par les mesures de caméra thermique.

## **CHAPITRE 3**

# **Étude des caractéristiques physico-chimiques des tissus**

## Table des matières

Introduction .....	78
1. Évaluation quantitative de la teneur en eau des tissus à base de fibres cellulosiques .....	78
1.1 Désorptions des tissus à base de fibres cellulosiques .....	79
1.1.1 Mesure de la teneur en eau par séchage en étuve.....	79
1.1.2 Cinétique de perte de masse en eau.....	79
1.2 Adsorption .....	83
2. Étude de la stabilité thermique de la cellulose .....	86
2.1 Analyse de la dégradation par thermogravimétrie .....	87
2.2 Détermination des températures de transition vitreuse.....	88
3. Evaluation objective d'état de surface des textiles.....	92
3.1 Coefficient de frottement contre la semelle du fer à repasser.....	93
3.2 Evaluation par traitement d'image.....	95
3.3 Evaluation des surfaces textiles par scan 3D .....	97
Conclusion.....	99

## Table des illustrations

<b>Figure 3. 1</b> Perte de poids en eau pour les échantillons qui ont été conditionnés à une RH de 65 % à température de séchage de 40°C. ....	80
<b>Figure 3. 2</b> Perte de poids en eau pour des échantillons 100% humides à température de séchage de 40°C.....	80
<b>Figure 3. 3</b> Courbes d'enveloppe de désorption : (a) Echantillons conditionnés à RH 65% (• Tissus à base de fibres cellulosiques 100% ; • Tissus à base de mélange de fibres (35% fibres cellulosiques, 65% fibres synthétiques) ; (b) Echantillons conditionnés à RH 100% (tout tissu). (--) courbe moyenne d'enveloppe. ....	82
<b>Figure 3. 4</b> Détermination des constantes de vitesse de premier ordre de désorption des tissus à base de fibres cellulosiques : (a) Echantillons conditionnés initialement à RH 65% ; (b) Echantillons initialement saturés en eau. ....	83
<b>Figure 3. 5</b> Reprise d'humidité à RH 65% et T=20°C. ....	84
<b>Figure 3. 6</b> Détermination des constantes de vitesse de premier ordre de désorption des tissus à base de fibres cellulosiques. ....	85
<b>Figure 3. 7</b> Analyses thermogravimétriques ATG : ligne verte continue : échantillon conditionné à RH 50%, ligne verte discontinue échantillon conditionné à RH 20%, ligne bleue continue dérivé de courbe verte continue, ligne bleue discontinue dérivée de courbe verte discontinue. ....	88

<b>Figure 3. 8</b> Scan DSC de différents fibres cellulosiques et mélange : (a) Premier cycle de scan, (b) Deuxième cycle de scan.....	89
<b>Figure 3. 9</b> Valeurs de Tg des fibres cellulosiques déterminées à partir de deux cycles de chauffe sur DSC. ....	90
<b>Figure 3. 10</b> Diffractogramme de rayons X grand angle (WAXS) de lin. ....	91
<b>Figure 3. 11</b> Position de pic en fonction de température exploitée de mesure de diffraction par rayons X. ....	92
<b>Figure 3. 12</b> Force d'adhésion statique sous différentes forces normales et températures entre la semelle du fer et le tissu en lin. ....	93
<b>Figure 3. 13</b> Coefficient de frottement de tissu de lin contre la semelle du fer sous différentes températures. ....	94
<b>Figure 3. 14</b> Coefficient de frottement de tissu de coton 2 contre la semelle du fer sous différentes températures. ....	94
<b>Figure 3. 15</b> Rendement de repassage sur la diminution de volume de froissement (a) et de la rugosité (b) de tissu de coton.....	98
<b>Figure 3. 16</b> Rendement de repassage sur la diminution de volume de froissement (a) et de la rugosité (b) de tissu de lin. ....	98
<b>Figure 3. 17</b> Représentation en graphes en étoile des rendements d'éliminations de froissement et de rugosité selon chaque conditionnement.....	99

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Mesures de perte de masse en eau des tissus à base de fibres cellulosiques après séchage dans l'étuve.....	79
<b>Tableau 2</b> : Vitesses apparentes de séchage des tissus .....	82
<b>Tableau 3</b> : Les vitesses apparentes de la désorption des tissus en coton 100% pour les deux conditionnements d'humidité relative. ....	85
<b>Tableau 4</b> : Mesures ATG des teneurs en eau.....	88
<b>Tableau 6</b> : Exemples des images avant et après traitement de différents tissus dans deux conditionnements: avant repassage et après repassage sans vapeur.....	96
<b>Tableau 7</b> : Conditionnement de repassage .....	97
<b>Tableau 8</b> : Résultats du scan 3D de tissu de coton .....	97
<b>Tableau 9</b> : Résultats du scan 3D de tissu de lin.....	97

## **Introduction**

Le troisième chapitre de ce manuscrit est consacré à la présentation et l'analyse des résultats expérimentaux obtenus lors de notre campagne d'essais à l'échelle de laboratoire. Ces analyses ont pour objectif la compréhension des mécanismes de froissement et de défroissement de tissus en coton et en lin en se basant sur les caractéristiques, d'abord intrinsèques de fibres cellulosiques et ensuite sur les conditions expérimentales tels que le degré d'hygrométrie et la température de transition vitreuse. Le chapitre est subdivisé en trois parties.

Dans la première partie, nous exposons les résultats de l'étude relative au comportement hygroscopique des matériaux, sorption-désorption d'eau, des éprouvettes textiles à base de fibres de lin et de coton. Les tests sont réalisés sous différentes conditions expérimentales de température et d'hygrométrie. La deuxième partie se focalise sur l'étude des aspects thermiques des fibres individualisées extraites de tissus examinés. Dans un premier temps, on suit l'évolution de perte de masse par thermogravimétrie. Cela permet à la fois d'évaluer la perte d'eau contenue dans l'éprouvette et d'étudier la cinétique de dégradation des fibres en fonction de la température.

Dans une deuxième phase, nous nous intéressons à la caractérisation morphologique des éprouvettes par analyse calorimétrique différentielle, DSC. On détermine les températures de transition vitreuse des échantillons secs et humides. La connaissance de la teneur en eau dans les échantillons soumis à l'étude pourrait expliquer le positionnement des Tg puis que l'eau joue un rôle de plastifiant de la phase amorphe de la structure semi-cristalline des fibres cellulosiques.

Enfin, la troisième partie de ce chapitre porte sur l'évaluation objective des surfaces textiles par trois méthodes différentes. Le choix du critère de base permettant la caractérisation de l'état de surface des éprouvettes repose sur les interactions entre la surface du textile et celle de la semelle du fer à repasser que l'on évalue par la mesure du coefficient de friction. La deuxième méthode de caractérisation s'appuie sur le principe d'analyse d'image par un logiciel adapté, Image J. La topographie des surfaces évaluée par ce logiciel permet de visualiser et de quantifier les niveaux de froissement ou du défroissement des tissus. Enfin, la troisième méthode consiste à scanner la surface du substrat textile par numérisation 3D. Cette opération est effectuée sur des échantillons avant et après repassage dans des conditions opératoires définies en termes de température et de débit de vapeur d'eau. L'avantage de cette méthode est double, non seulement, elle permet de caractériser la surface du tissu mais également d'optimiser le mode de repassage.

### **1. Évaluation quantitative de la teneur en eau des tissus à base de fibres cellulosiques**

Les matériaux cellulosiques sont naturellement hygroscopiques. La connaissance de la teneur en eau dans les échantillons est nécessaire pour la suite de notre étude. Les méthodes

mises en œuvre pour la détermination de l'eau absorbée par les échantillons ont été décrites dans le chapitre 2.

## 1.1 Désorptions des tissus à base de fibres cellulosiques

### 1.1.1 Mesure de la teneur en eau par séchage en étuve

Des mesures ont été effectuées sur des échantillons préparés dans des conditions standards de température et d'humidité relative (20°C et RH 65%). Les éprouvettes ont été installées dans une étuve programmée en température. La durée de traitement a été fixée à 48 h. Deux essais ont été réalisés : l'un à 45°C et l'autre à 100°C. Les pertes de masse sont strictement liées à la désorption d'eau. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 1 et représentent une moyenne de cinq mesures par échantillon.

**Tableau 1: Mesures de perte de masse en eau des tissus à base de fibres cellulosiques après séchage dans l'étuve**

Echantillon	Perte de masse en (%) $\pm e$ (%)	Perte de masse en (%) $\pm e$ (%)
	après séchage pendant 48 h à T=45°C	après séchage pendant 48 h à T=100°C $\pm CV$
<b>Lin</b>	4,3 $\pm$ 0.17	8,4 $\pm$ 0.42
<b>Coton 1</b>	1,3 $\pm$ 0.01	7 $\pm$ 0.35
<b>Coton 2</b>	0,6 $\pm$ 6 $\times$ 10 <sup>-3</sup>	6,4 $\pm$ 0.25
<b>Coton 3</b>	7,2 $\pm$ 0.36	12,6 $\pm$ 0.75
<b>Coton 30%/ PET 60%</b>	0,1 $\pm$ 2 $\times$ 10 <sup>-4</sup>	0,8 $\pm$ 5 $\times$ 10 <sup>-3</sup>

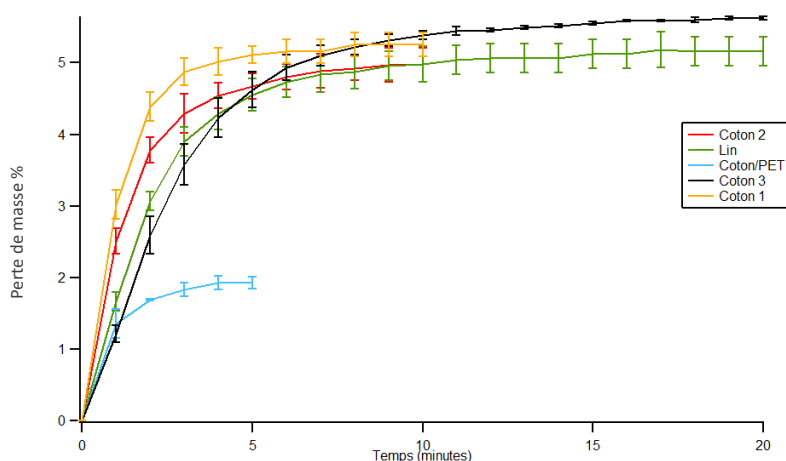
Sur le tableau 1, nous remarquons que la teneur en eau varie d'un matériau à l'autre. La perte en eau la plus élevée est attribuée au coton 3 (sergé) dont la masse surfacique est la plus importante. Les étoffes de même type d'armure (toile) et de masses surfaciques voisines, montrent une teneur en eau dans un ordre décroissant : le lin, coton1 (blanchi), coton2 (brut). Le polyester étant une fibre hydrophobe explique le fait que l'échantillon coton/PET ait la plus faible absorption d'eau. En ce qui concerne le mode de séchage en fonction de la température, on constate qu'avec une température de 100°C la perte massique en eau est plus importante et elle avoisine la masse maximale d'eau que peut absorber une fibre, entre 6 et 8 % en masse pour le coton [11-12] et entre 7.9 et 10 % pour le lin [13], stockée dans un environnement maintenu à 65% en humidité relative et à température ambiante. Le séchage à 45°C est insuffisant pour éliminer la totalité d'eau retenue par les fibres même après une durée de traitement thermique prolongée jusqu'à 48 h en étuve. La désorption totale nécessite soit une durée bien plus longue ou d'élever la température du traitement. Pour ce faire, nous avons effectué des traitements à 100°C pendant 48h. Les résultats obtenus montrent une élimination, plus efficace, d'eau chimiquement sorbée.

### 1.1.2 Cinétique de perte de masse en eau

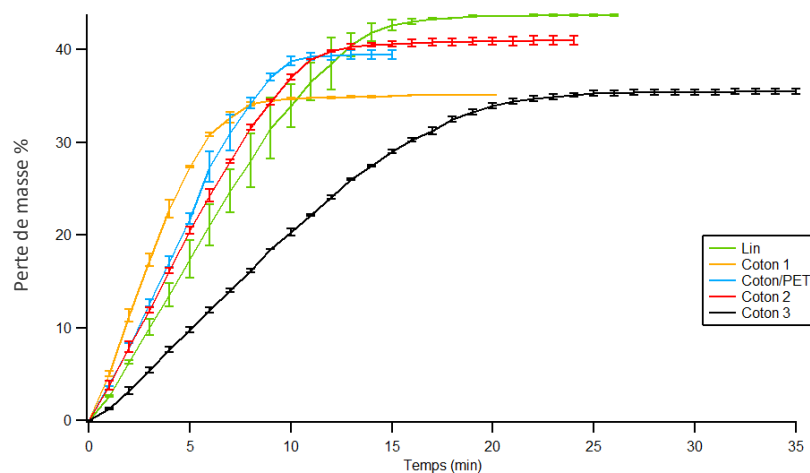
Le suivi en continu de l'évolution de la masse des éprouvettes soumises à l'étude dans un dessiccateur infrarouge permet d'étudier le mécanisme de désorption d'eau en fonction du temps. Les résultats expérimentaux sont reportés sur les figures 3.1 et 3.2. Le faisceau de

courbes de la figure 3. 1 correspond aux échantillons ayant subi un stockage à 20°C et à 65% RH. Le deuxième lot correspond à des tissus saturés en humidité par trempage dans l'eau pendant 30 minutes suivi d'un foulardage dont le taux d'exprimage est de 40%. Sur ces figures, il est possible de suivre la cinétique de perte de masse en eau pour chaque échantillon.

Le faisceau de courbes de la figure 3. 1 montre une cinétique de désorption d'eau caractérisée par 3 phases : La première correspond à une désorption rapide, entre 0 et 3 minutes, suivie par une autre dont la vitesse est nettement plus atténuée située dans l'intervalle compris entre 3 et 6 minutes et en enfin une dernière phase beaucoup plus lente tendant vers une désorption asymptotique, c'est - à - dire tendant vers l'équilibre de déshydratation des échantillons. Nous observons la même tendance pour le faisceau de courbes de la figure 3. 2 mais avec une cinétique différente et avec une durée d'observation plus longue. Le mécanisme de désorption d'eau, en trois phases, dans les deux situations, correspond d'abord à l'évaporation rapide de d'eau de surface et en suite à l'évaporation de celle contenue dans la masse de l'échantillon. Dans ce cas la vitesse de désorption est nettement plus faible. La dernière phase correspond probablement à la désorption de couches d'eau adsorbées et accumulées en profondeur dans le volume libre accessible de la phase amorphe du matériau [98].



**Figure 3. 1** Perte de masse en eau pour les échantillons qui ont été conditionnés à une RH de 65 % à température de séchage de 40°C.



**Figure 3. 2** Perte de masse en eau pour des échantillons 100% humides à température de séchage de 40°C.



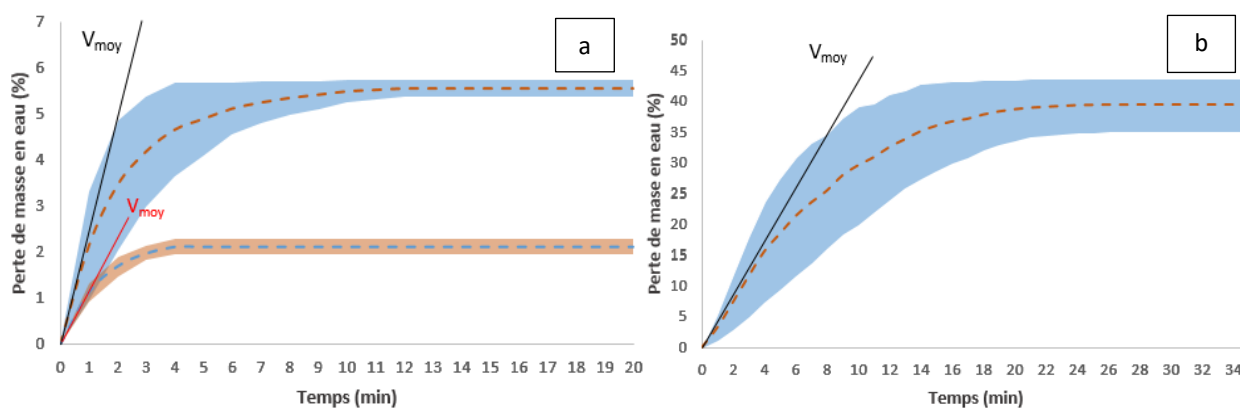
Les vitesses initiales apparentes de désorption calculées à partir des pentes des à l'origine des courbes des figure 3. 1 et figure 3. 2 sont consignées dans le tableau 2.

Si l'on ne tient compte que de la masse surfacique, le séchage des éprouvettes s'effectuerait dans un ordre bien précis. Le coton 1 sèche en premier, suivi par le coton 2 et coton 3. Le lin occupe la quatrième position, suivi par le tissu en mélange coton / PET. Le coton 3 est celui qui met le plus de temps à sécher compte tenu de sa masse surfacique, la plus élevée  $440\text{g/m}^2$ . Le classement par vitesse de séchage est en bon accord avec les masses surfaciques des échantillons conditionnés en température et en humidité relative ( $22\text{ }^\circ\text{C}$  et RH 65%).

En se référant aux vitesses apparentes initiales de désorption d'eau des échantillons saturés en humidité (figure 2 et tableau 2), on constate une similitude dans le comportement, à la fois, dans l'allure du faisceau de courbes de désorption d'eau et dans l'ordre de séchage. Cependant, le tissu en coton/PET se sèche plus rapidement que les autres tissus à l'exception du coton1 en raison du caractère hydrophobe du polyester.

Dans la figure 3. 3, on présente les enveloppes de courbes de la désorption pour les deux lots d'échantillons. Les enveloppes déterminées et présentées sur la figure 3. 3, rassemblent toutes les courbes de déshydratation de tout tissu employé dans cette étude tenant compte les dispersions des maxima et minima des mesures.

L'évolution de la quantité d'eau évaporée au cours de temps d'un tissu quelconque à base de fibres cellulosiques sera incluse dans une enveloppe des trois enveloppes montrées sur la figure 3. En effet, un tissu qui est composé des fibres cellulosiques uniquement et conditionné initialement à une humidité relative de 65%, sa courbe de désorption sera contenue dans l'enveloppe en bleu de la figure 3. 3.a où cette enveloppe présente une dispersion plus au moins large dans les deux premières phases de séchage et une dispersion faible à l'équilibre. Un autre tissu à base d'un mélange de fibres cellulosiques et de fibres synthétiques et de même conditionnement, sa courbe de désorption ne sera pas incluse dans la même enveloppe de celle des fibres purement cellulosiques. De plus, l'enveloppe des tissus à base de mélange des fibres sera toujours inférieure à celle des tissus à base de fibres purement cellulosiques étant donné le caractère hydrophobe des fibres synthétiques (polyester, polyamide, acrylique...). Quant aux échantillons saturés en eau, peu importe la composition (purement cellulosiques ou cellulosiques avec fibres synthétiques), la courbe de déshydratation sera toujours dans l'enveloppe présentée sur la figure 3.b. On remarque que cette enveloppe est plus large et a plus de dispersion par rapport au premier lot. Cette dispersion est dû à l'importante quantité d'eau adsorbée par les fibres.



**Figure 3.3** Courbes d'enveloppe de désorption : (a) Échantillons conditionnés à RH 65% (• Tissus à base de fibres cellulosiques 100% ; • Tissus à base de mélange de fibres (35% fibres cellulosiques, 65% fibres synthétiques) ; (b) Échantillons conditionnés à RH 100% (tout tissu). (--) courbe moyenne d'enveloppe.

Pour pouvoir comparer les vitesses de séchage entre elles et les corréliser avec les masses surfaciques on a sélectionné les étoffes en coton à savoir les coton 1, 2 et 3. Dans tableau 2, on présente les vitesses apparentes de désorption calculées à partir des pentes à l'origine de courbes de séchage pour les deux lots d'humidité relatives différentes. Comme on présente aussi dans le même tableau les vitesses initiales apparentes moyennes des courbes d'enveloppe de désorption pour les deux lots.

**Tableau 2:** Vitesses apparentes de séchage des tissus

Échantillon	Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> )	Vitesse apparente de désorption (masse %/min)	
		pour échantillons conditionnés à RH 65%	pour échantillons conditionnés à RH 100%
Coton 1	170	3,23	5,03
Coton 2	190	2,74	3,93
Coton 3	440	1,09	1,21
	<i>Vitesse moyenne</i>	2,35	3,39
	<i>V<sub>moy</sub> d'enveloppe</i>	2,14	3,22

Visiblement, la désorption des échantillons non saturés en eau du premier lot est plus lente globalement que le deuxième lot. En fait, dans le premier lot, l'eau qui s'évapore en premier (en première phase) est absorbée sur la surface de fibres probablement sous forme de monocouches minces voir superposées. Alors que dans le deuxième lot, l'eau est sorbée complètement sous forme d'édifices composées de superposition de monocouches. Dans les deux cas, cette eau est facile à évaporer, sauf que dans le deuxième cas on a plus de quantité d'eau d'où une désorption plus rapide que le premier lot.

D'autre part, en comparant les vitesses de désorption entre les échantillons de même lot, on observe une diminution de vitesse dans le sens croissant de masse surfacique. Autrement dit, la vitesse de désorption est inversement corrélable avec la masse surfacique de matériau. Ainsi, la désorption des tissus légers est plus rapide que des tissus plus lourds et vis-versa.

La figure 3. 4 présente les droites du premier ordre pour les différentes mesures expérimentales de deux lots (RH 65% et saturé en eau). L'équation employée pour la cinétique de premier ordre est comme suit :

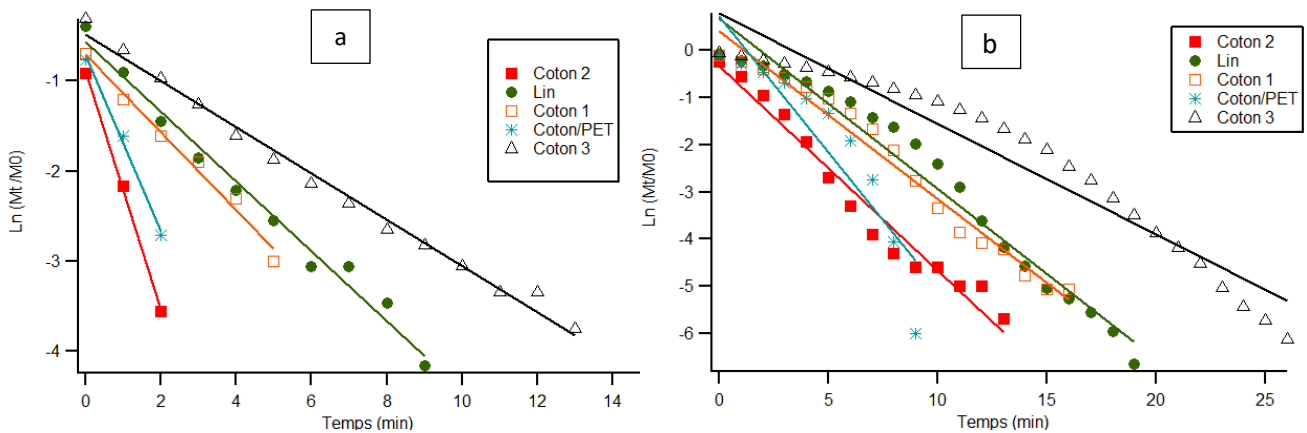
$$y(t) = \ln(m_t/m_0) \quad (\text{III.1})$$

Avec

$m_t$  : la masse total instantannée d'eau évaporée

$m_0$  : masse initiale d'eau évaporée

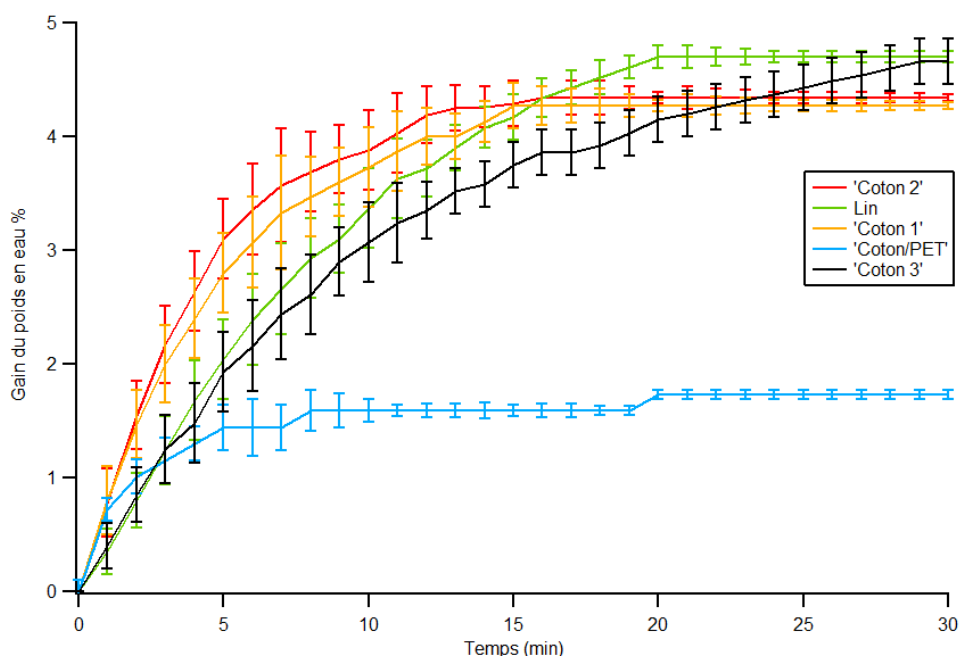
On constate que pour le lot des tissus conditionnés à RH 65%, figure 3. 4(a), suivent bien une cinétique de premier ordre. Quant aux tissus saturé en eau, figure 3. 4(b), seulement les tissus coton 1 et coton 2 (tissus en coton 100% et d'armure toile) suivent une cinétique de premier ordre. Pour le reste d'échantillon (tissu mélange et épais) ce modèle cinétique n'est pas accordé.



**Figure 3. 4** Détermination des constantes de vitesse de premier ordre de désorption des tissus à base de fibres cellulosiques : (a) Échantillons conditionnés initialement à RH 65% ; (b) Échantillons initialement saturés en eau.

## 1.2 Adsorption

Les mêmes échantillons passés à l'analyse de séchage par le dessiccateur infrarouge sont récupérés à l'état sec et exposés ensuite à un milieu de conditionnement standard (RH 65% et  $T=20^\circ\text{C}$ ) sur une balance pour mesurer la reprise de masse en eau. Les courbes de reprise d'humidité sont données sur la figure 3. 5.



**Figure 3. 5** Reprise d'humidité à RH 65% et T=20°C.

L'allure de l'évolution de reprise de masse en eau est très semblable à celle de courbes de perte de masse en eau. En effet, on aperçoit que les échantillons récupèrent presque la totalité de masse d'eau évaporée lors du séchage au bout d'une vingtaine de minutes sauf pour le coton 3 où la courbe de reprise d'humidité n'a pas encore atteint un plateau d'équilibre de masse (saturation en eau). Ce qui veut dire que le tissu de coton 3, le plus épais, avec la masse surfacique la plus élevée nécessite plus de temps pour pouvoir récupérer la totalité de teneur en eau évaporée.

À une humidité relative faible, on observe une sorption rapide de l'eau suggérant une adsorption monocouche et multicouche, qui voit l'eau s'associer aux molécules polaires -OH de la cellulose, tant dans les régions amorphes qu'à la surface des cristallites (Wertz, Bédué et al. 2010).

Maintenant si on souhaite comparer la vitesse apparente initiale d'adsorption à celle de désorption des échantillons conditionnés à RH de 65% en s'appuyant sur le tableau 3, on peut voir clairement que le mécanisme d'adsorption est beaucoup plus lent que la désorption pour tous les tissus analysés. La chaleur qui a été appliquée pour effectuer le séchage des tissus est probablement le facteur qui a accéléré la désorption alors que pour la sorption on a introduit aucun facteur accélérant ce mécanisme.

**Tableau 3 :** Les vitesses apparente de la désorption des tissus en coton 100% pour les deux conditionnements d'humidité relative.

Échantillon	Vitesse apparente de désorption (masse %/min) pour échantillons conditionnés à RH 65%	Vitesse apparente de sorption (masse %/min) pour échantillons secs dans un milieu de RH 65%
Coton 1	3.23	0.8
Coton 2	2.74	0.78
Coton 3	1.09	0.4
Lin	1.66	0.35
Coton/PET	1.35	0.72

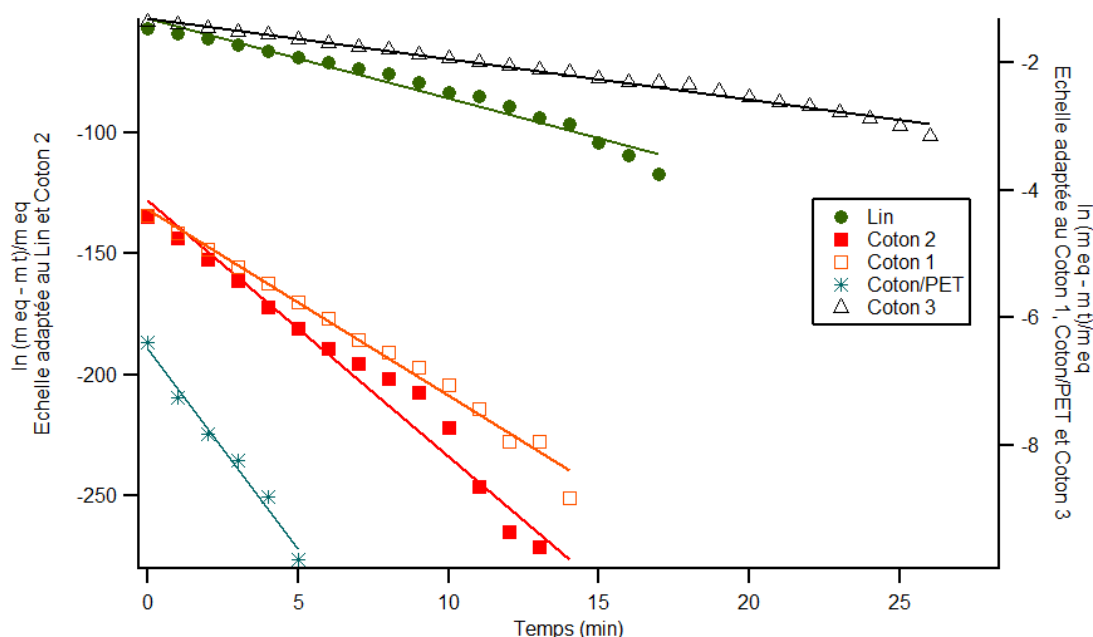
L'augmentation de la masse en eau suit une cinétique de premier ordre comme en témoigne la figure 3. 6. Ainsi, la cinétique de l'augmentation de masse observée peut être décrite par l'équation:

$$y(t) = \log(m_{eq} - m_t) / m_{eq} \quad (III.2)$$

Où

$m_{eq}$  est la masse d'eau totale adsorbée à l'équilibre.

$m_t$  est la masse d'eau instantanée adsorbée par l'échantillon.


**Figure 3. 6** Détermination des constantes de vitesse de premier ordre de désorption des tissus à base de fibres cellulosiques.

Pour conclure, les tissus hygroscopiques et plus précisément les tissus à base de fibres cellulosiques suivent le même ordre cinétique, ordre cinétique du premier ordre, à l'adsorption et désorption d'eau à l'exception des tissus épais et mélange dans l'état de saturation en eau. Les vitesses de la reprise/perte d'eau dépendront essentiellement de l'épaisseur, de la masse surfacique, de l'armure et de la nature des fibres composant le tissu.

## 2. Étude de la stabilité thermique de la cellulose

Le coton et le lin sont des bio-polymères appartenant à la famille des polysaccharides. Brute de récolte, les matériaux cellulosiques sont naturellement hydrophobes mais avec des traitements chimiques en milieu fortement alcalin, ils deviennent très hydrophiles. Ces biomatériaux renferment dans leur structure des fonctions chimiques polaires qui interagissent avec l'eau. Dans les conditions normales de température, de pression et d'humidité, les polysaccharides retiennent une quantité d'eau allant de 8 à 10% en masse du matériau.

Les molécules d'eau retenues par la cellulose, par exemple, peuvent être soit physisorbées, soit chimisorbées ou encore fixées par les deux modes de rétention. Les matériaux cellulosiques sont des composés semi-cristallins. La phase cristalline, responsable de la compacité et de l'ordre morphologique du matériau, est prépondérante. En revanche, la fraction de phase amorphe, plus faible que celle de la phase cristalline, est responsable de la plupart des propriétés intrinsèques du matériau notamment les propriétés thermomécaniques. La présence d'eau au sein du biomatériau plastifie la phase amorphe et conduit à un assouplissement de l'ensemble de la structure et modifie bon nombre de ses propriétés physiques et chimiques. C'est cette composante qui va être sollicitée et exploitée dans les opérations de repassage des textiles en coton et en lin concernés par notre étude. L'analyse des interactions eau-phase amorphe de la cellulose sont fondamentales pour la compréhension des mécanismes de froissement et de defroissement des étoffes à base de cellulose et de ses dérivés et par voie de conséquence pour l'optimisation du repassage des vêtements.

Lorsqu'un matériau cellulosique tel que le coton est soumis à un balayage de température dans un large domaine, selon sa teneur en eau, on peut observer une transition thermique du second ordre, associée à la phase amorphe, qualifiée de transition vitreuse ou Tg. L'amplitude des mouvements de chaînes ou de segments de chaînes macromoléculaires dans la phase amorphe et la position en température de cette transition est fortement liée à la masse d'eau contenue dans le matériau (Wunderlich, 2005[99], Salmèn et Back 1977 [57] ...)

Pour un matériau complètement déshydraté, la zone de transition vitreuse se superpose au début de la zone de dégradation de la cellulose comme le mentionnent Salmèn et Back 1977, c'est-à-dire vers 220 °C. En revanche, pour un matériau saturé en humidité, la zone de transition vitreuse serait, selon ces mêmes auteurs, située dans un domaine de températures négatives. Cela complique la détermination expérimentale de la Tg. S'ajoute à cette difficulté le type de technique employée pour sa détermination. La technique la plus couramment utilisée est le balayage calorimétrique différentiel, DSC. Dans ce cas, certains auteurs soulignent qu'il est préférable de déterminer la Tg en mode refroidissant pour éviter l'effet masquant de l'eau dans la zone de transition vitreuse (Salmèn et Back). D'autres techniques, RMN, DRX, dilatométrie, spectroscopie diélectrique, thermo-courants stimulés etc..., plus lourdes sur le plan expérimental, peuvent être également utilisées lorsque la DSC ne suffit pas pour la détermination de la Tg, c'est le cas du lin dans notre étude. Pour ce faire, nous avons eu recours à l'emploi de la technique de diffraction des rayons X aux grands angles.

Dans la suite de cette étude, nous examinerons le comportement et la stabilité thermique de nos matériaux en mettant en œuvre les techniques classiques décrites dans le chapitre 2, en l'occurrence, l'analyse thermogravimétrique, ATG, le balayage calorimétrique différentiel, DSC et la diffraction des rayons X, DRX.

Dans un premier temps, nous analyserons les pertes de masse de nos éprouvettes par ATG et dans un second temps nous étudierons leur comportement morphologique. Nous déterminerons les températures de transition vitreuse par DSC dans le cas des éprouvettes en coton et par DRX celle de l'échantillon en lin.

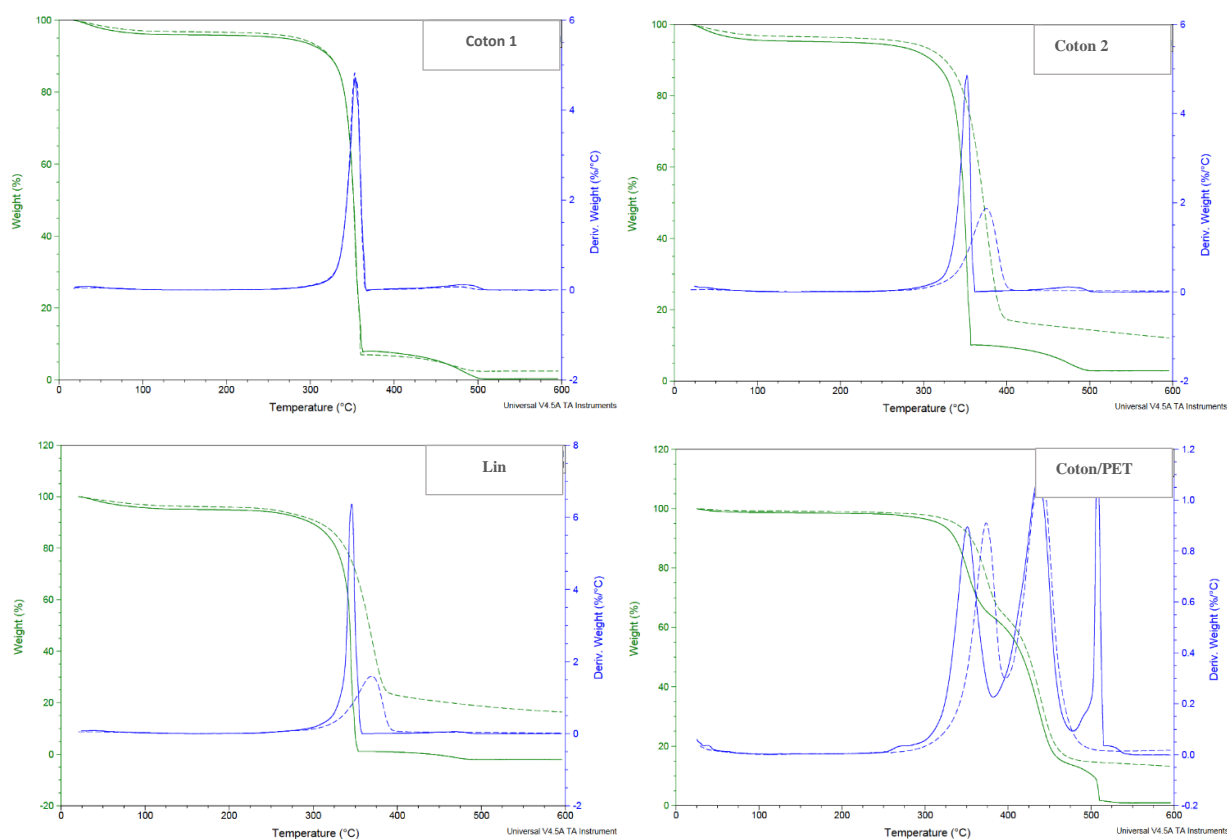
### **2.1 Analyse de la dégradation par thermogravimétrie**

Dans le but d'évaluer la stabilité thermique des échantillons concernés par l'étude, dans et au de-là du domaine de température d'utilisation des matériaux en tant que produit textile, nous avons procédé à l'enregistrement des spectres ATG de l'évolution des masses en fonction de la température. Les expérimentations ont été réalisées avec une vitesse de chauffage de 10°C/min et couvrent un domaine de température allant de 25°C à 600°C. Les résultats de nos expérimentations sont reportés sur la figure 3. 7. Les valeurs numériques extraites des spectres ATG correspondantes sont consignées dans le tableau 4, représentant le lin, le coton 1, le coton 2 et mélange coton/PET.

Dans tous les cas, nous observons une perte de masse qui se manifeste dès 50°C et se poursuit jusqu'à 100°C. Cette perte de masse correspond à l'évaporation de molécules d'eau libres emmagasinées dans le matériau. Les molécules chimiquement fixées ne s'évaporent qu'à hautes températures, vers 170°C selon Salmèn et Back [57]. L'évaporation du restant des molécules d'eau liées chimiquement aux fibres se superpose au début de la perte de masse due à la dégradation thermique des matériaux à partir de 250°C et se poursuit lentement jusqu'à 300°C. Au de-là de cette température, la dégradation survient quasi instantanée pour tous les échantillons. La séparation de la proportion de masse d'eau de celle du matériau dans l'intervalle de température entre 250°C et 300°C devient impossible par thermogravimétrie. Dans cet intervalle de température les thermo-grammes sont des enregistrements bruts représentant la perte totale en masse. A partir des courbes de la figure 3. 7, on observe très clairement l'effet du conditionnement hygrométrique, les échantillons stockés à 50% d'humidité relative, tracé continu, perdent plus de masse d'eau que ceux qui ont été conditionnés 20 %, tracé pointillé, toutes autres conditions égales par ailleurs. Les valeurs numériques correspondantes aux pertes de masse sont reportées dans le tableau 4. Il est à noter que dans tous les cas, même à 600°C, la perte de masse n'est pas totale, mais une faible masse de carbone fixe et des cendres, subsiste [100].

**Tableau 4 : Mesures ATG des teneurs en eau**

	Humidité relative 20%	Humidité relative 50%
	Teneur en eau (%)	Teneur en eau (%)
<b>Coton 1</b>	3,2	4
<b>Coton 2</b>	3,4	4,7
<b>Lin</b>	3,7	5
<b>Coton/PET</b>	0,8	1,4



**Figure 3. 7** Analyses thermogravimétriques ATG : ligne verte continue : échantillon conditionné à RH 50%, ligne verte discontinue échantillon conditionné à RH 20%, ligne bleue continue dérivé de courbe verte continue, ligne bleue discontinue dérivée de courbe verte discontinue.

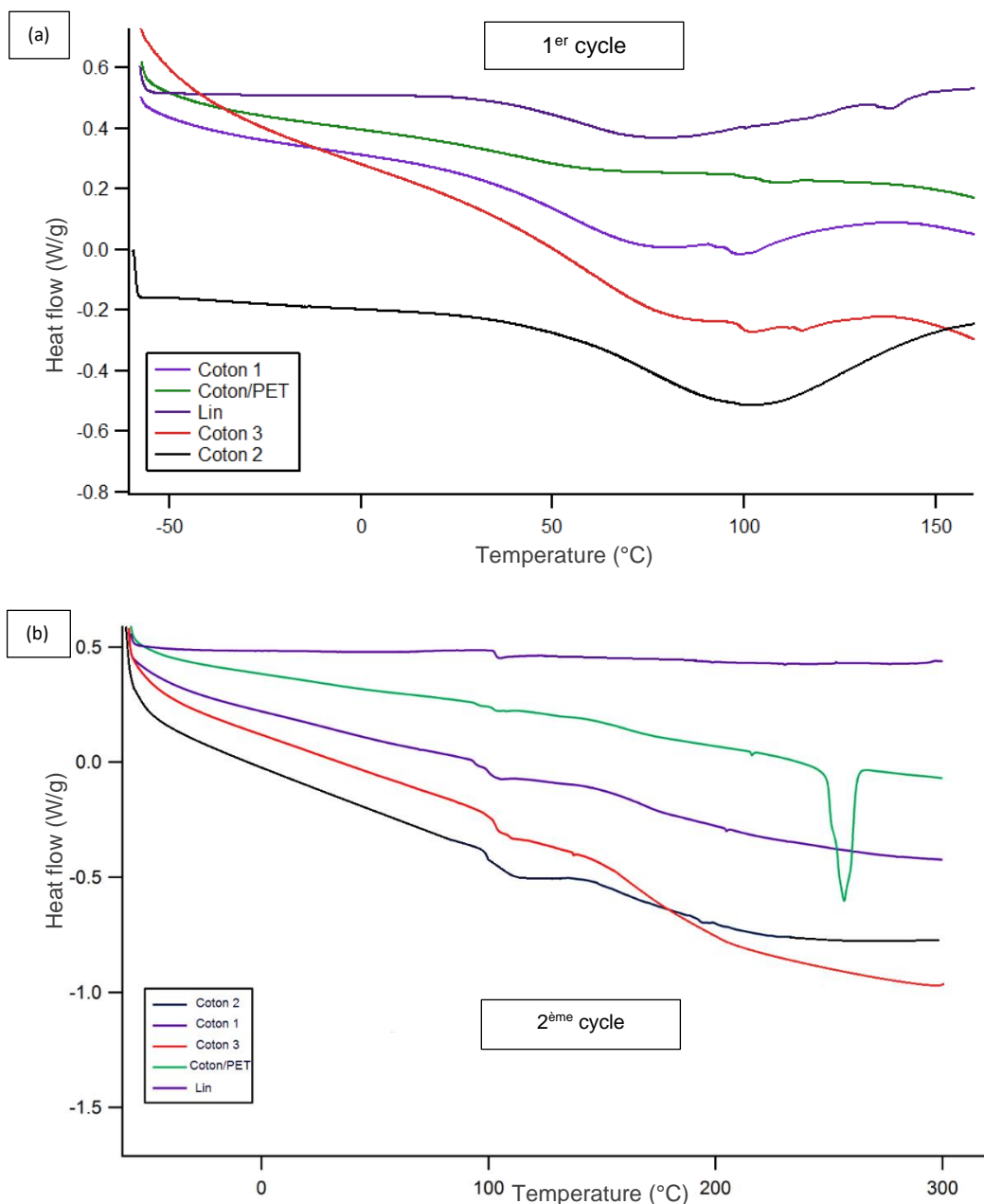
L'effet du conditionnement hygrométrique se manifeste très clairement sur les courbes ATG où l'on observe que le stockage des échantillons à 50 % d'humidité relative retarde légèrement le démarrage de la thermo-dégradation des éprouvettes à l'exception du coton 1 qui a subi un traitement de blanchiment le rendant probablement plus hydrophile que les autres échantillons.

## 2.2 Détermination des températures de transition vitreuse

La détermination des Tg relatives aux fibres a été réalisée grâce à l'emploi d'une analyse calorimétrique différentiel (DSC). Comme ça été mentionné précédemment dans le chapitre 2, on a effectué un balayage sur deux cycles pour chaque échantillon : une première chauffe pour



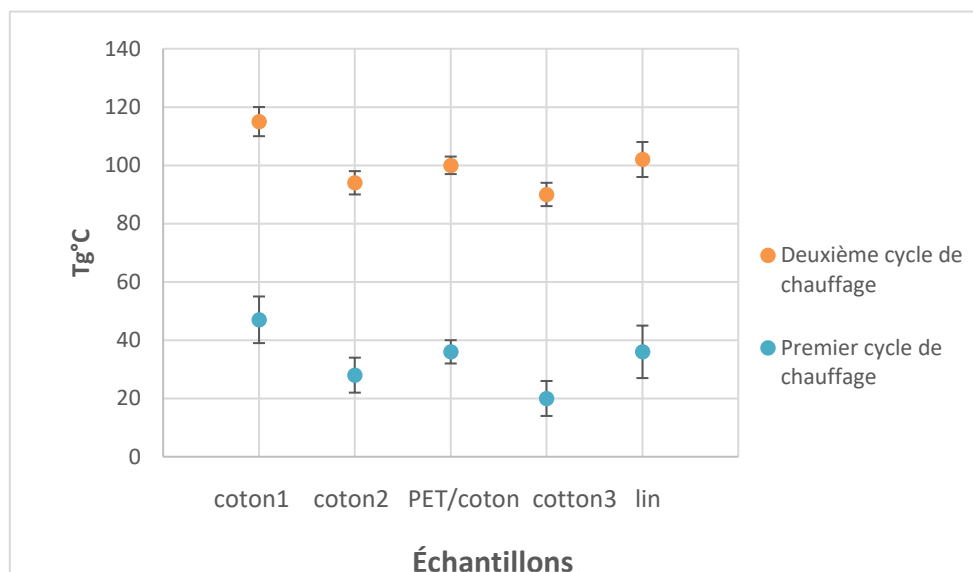
déterminer une première température de transition vitreuse d'échantillon partiellement humide. Ensuite une deuxième chauffe pour déterminer la deuxième Tg d'échantillon complètement sec. La figure 3. 8 rassemble les tracés DSC de deux cycles pour tous les échantillons.



**Figure 3. 8** Scan DSC de différents fibres cellulosiques et mélange : (a) Premier cycle de scan, (b) Deuxième cycle de scan.

Une augmentation de capacité de chaleur, traduit par un décalage vers le bas du tracé, signifie qu'une transition vitreuse a eu lieu. La détermination de Tg a été établie graphiquement. On remarque que ce changement de capacité ne se produit pas instantanément, mais a lieu sur une

plage de températures. Cela rend la détermination exacte de  $T_g$  plutôt difficile, mais nous utilisons la méthode bien connue des tangentes pour déterminer  $T_g$ .



**Figure 3. 9** Valeurs de  $T_g$  des fibres cellulosiques déterminées à partir de deux cycles de chauffe sur DSC.

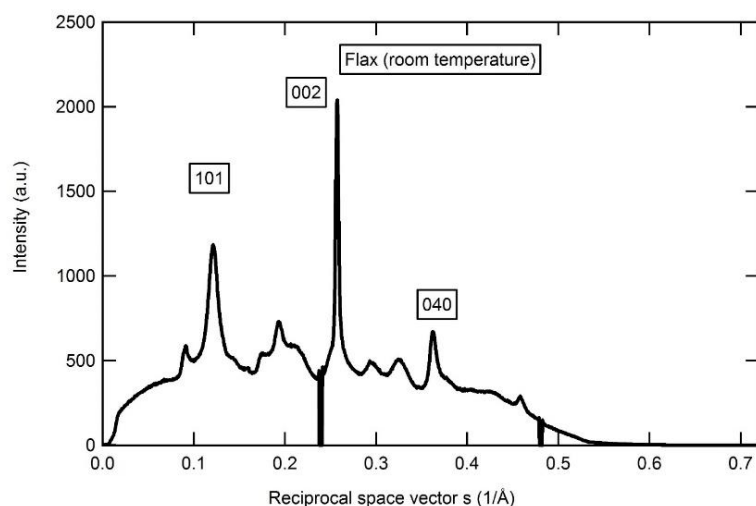
Sur la figure 3. 9 sont reportées les températures de transition vitreuse issues de la première montée en température, les points en bleu, et celles déterminées à partir du second passage en température sur les mêmes échantillons, en points vert. Il est à noter que le premier cycle dessèche les fibres. Le fait de sécher les éprouvettes dans le four de l'appareil suite au premier cycle de température sous atmosphère sèche et inerte empêche la sorption de l'eau lors du retour à la température ambiante. Le second cycle est conduit donc sur des éprouvettes exempts d'humidité, qui a été évaporée à 100°C, avec des températures de transition plus élevées.

On constate que les températures de transition vitreuse de différents échantillons mesurées lors de premier cycle de chauffe sont bien inférieures à celles mesurées au deuxième cycle de chauffe. Cette transition de température d'une plage à une autre plus élevée après une première chauffe se justifie par la présence d'eau sorbée dans les fibres jouant le rôle d'agent plastifiant abaissant, par conséquent, les températures de  $T_g$ .

Toutefois, il faut mentionner que les mesures de  $T_g$  par DSC sont assez délicates la zone de fusion d'eau masque et se superpose presque complètement à la zone de la température de transition vitreuse qui rend la détermination de la  $T_g$  délicate [59].

Nous avons vu qu'il était, non seulement, délicat voire difficile de déterminer avec précision les  $T_g$  des matériaux cellulosiques par DSC en raison de la rétention d'eau par le matériau mais aussi l'inadaptation de la forme géométrique de l'éprouvette à tester à la technique. C'est le cas des fibres de lin. La réalisation d'un thermo-gramme DSC nécessite un bon contact entre l'échantillon et le capteur thermique du four de l'appareil. Ce qui implique que l'éprouvette à tester doit avoir une surface de contact suffisante entre le capteur et l'échantillon. Cette condition n'est pas requise dans le cas lin en raison de la forme géométrique des fibres.

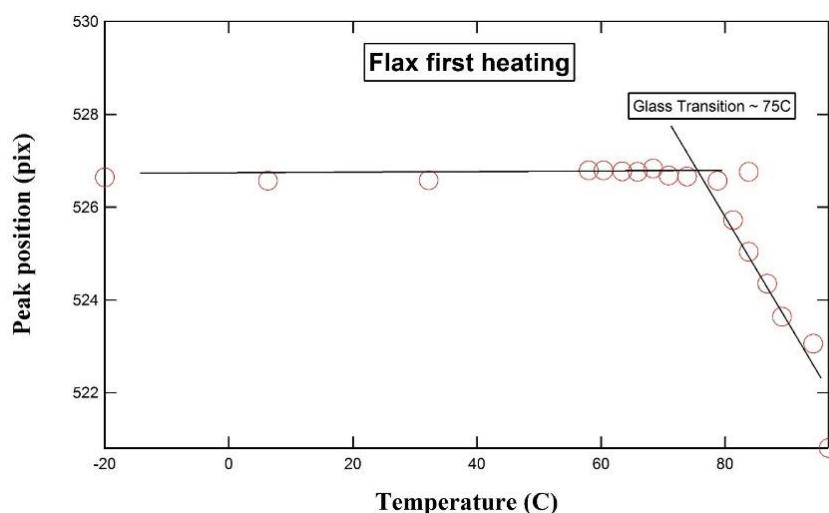
Ainsi pour déterminer la  $T_g$  du lin nous avons eu recours à la technique de DRX. Le protocole expérimental consiste à utiliser la diffraction des rayons X aux petits et grands angles en géométrie de transmission au faisceau BM26B de l'Installation européenne de rayonnement synchrotron (ESRF) à Grenoble (France). La température a été modifiée in situ avec un étage chauffant LINKAM relié au système de contrôle SPEC. La figure 3. 10 ci-dessous présente un modèle typique WAXS de lin.



**Figure 3. 10** Diffractogramme de rayons X grand angle (WAXS) de lin.

Les pics les plus intenses peuvent être assignés à la phase  $I_{\beta}$  de la cellulose (forme monoclinique de la cellulose I), comme décrit dans la littérature [21]. La position des pics en fonction de la température peut aider à calculer la dilatation thermique du réseau et à identifier les températures de transition caractéristiques. Par exemple, le graphique sur la figure 3. 10 montre la position du premier pic fort de l'échantillon de lin en fonction de la température. On peut voir que, au-dessus de  $75^{\circ}\text{C}$  environ, la position de pic commence à changer rapidement (c.-à-d. beaucoup plus vite qu'elle ne l'était en dessous de cette température).

Le changement de la position du pic correspond à l'expansion thermique de la cellule unitaire, ce qui est logique dans ces conditions (le déplacement du pic vers des nombres de pixels inférieurs représente l'augmentation de l'espace correspondant). Ce changement de pente est caractéristique de la température de transition vitreuse. Fait important, l'expérience présentée ici est réalisée sur des fibres de lin « humides », car il s'agit du premier chauffage. Par conséquent, la valeur obtenue de  $75^{\circ}\text{C}$ , figure 3. 11, semble être cohérente avec les données DSC présentées ci-dessus. Il est à noter que le taux de chauffage était plus bas dans ce cas ( $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  contre  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  pour le DSC).



**Figure 3. 11** Position de pic en fonction de température exploité de mesure de diffraction par rayons X.

Il convient de mentionner un problème technique rencontré dans les expériences qui consiste en un endommagement prononcé de matériau dû au faisceau. Toutes les données expérimentales obtenues ne peuvent pas être exploitées en raison de cet effet.

Ce qu'on peut tirer de ces expériences est que la mesure de Tg des fibres cellulosiques est assez complexe et délicate. Néanmoins, on a pu observer l'effet plastifiant de l'eau au sein des matériaux cellulosiques.

Pour les polymères semi-cristallins, la présence de régions cristallines dans le polymère interfère avec le processus de transition dans les régions amorphes. De toute évidence, la transition vitreuse perd de son importance au fur et à mesure que la cristallinité augmente et peut disparaître totalement à des cristallinités élevées en raison de volumes trop faibles de matériau amorphe [57].

Les données concernant l'influence de la teneur en humidité sur la température de transition vitreuse de la cellulose sont contradictoires. On a affirmé que la transition vitreuse se produisait à température ambiante pour des valeurs de teneur en humidité inférieures à 6 % et supérieures à 50 %, alors que d'autres études n'ont détecté aucune transition.

### 3. Evaluation objective d'état de surface des textiles

Depuis les années 50, le froissement des étoffes textiles constitue un sujet de recherche assez complexe en raison de la subjectivité de l'évaluation humaine [101]. L'évaluation de l'état de surface d'un textile après repassage a comme but dans notre étude de déterminer les paramètres optimaux d'un bon repassage (température, débit de vapeur, teneur en eau dans le textile). Toutefois, l'évaluation des surfaces textile optée par l'industrie de nos jours est subjective (la méthode de l'AATCC [70]). Cette méthode qui consiste en un jugement d'une apparence visuelle de l'aspect de la surface est pourtant peu fiable.

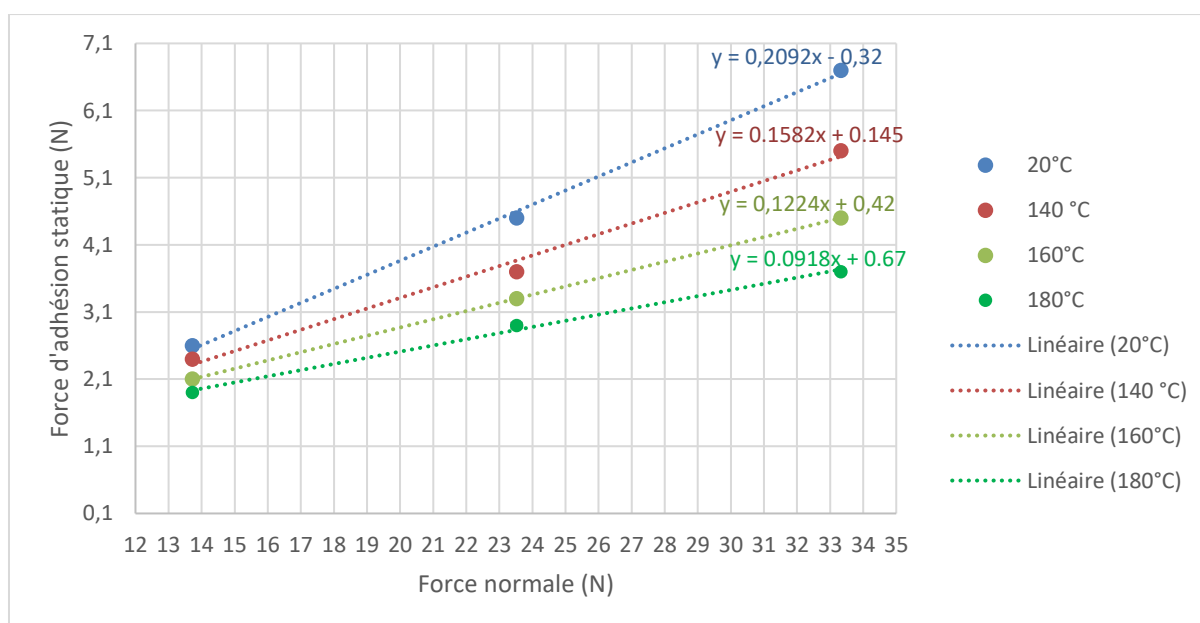
C'est pour cette raison et suite à un besoin industriel de méthodes objectives d'évaluation de froissement, la technique d'analyse d'images a été développée et largement utilisée pour satisfaire ce besoin [102, 103, 104]. Cependant cette technique de traitement d'image a certaines limitations comme on va le voir plus tard dans cette partie. D'où on a développé d'autres méthodes d'évaluation telle que l'évaluation du coefficient de frottement de surface de l'étoffe contre la semelle de fer à repasser et le scan 3 D des surfaces textiles.

### 3.1. Coefficient de frottement contre la semelle du fer à repasser

Le coefficient de frottement des tissus en cours de repassage contre la semelle du fer à repasser peut refléter l'état de surface de tissu sous la semelle et son comportement éventuellement sous différentes températures et différents débits de vapeur.

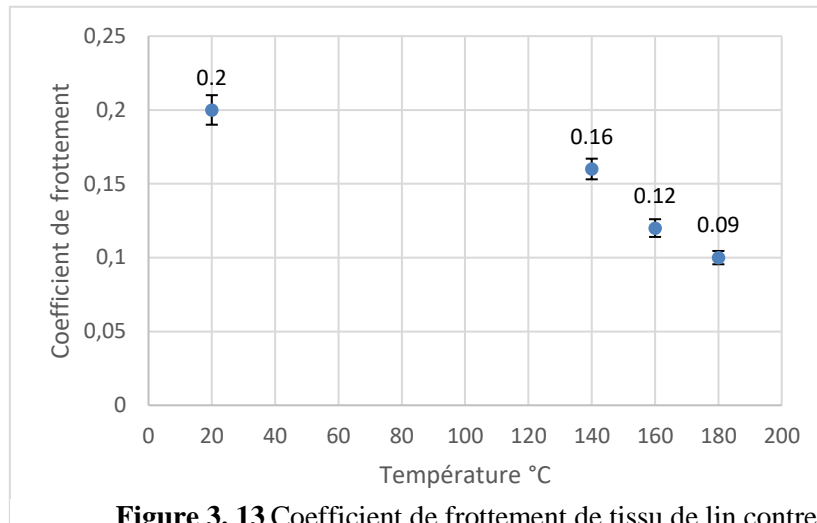
Dans la suite on présente que les mesures de coefficient de frottement sous différentes températures de semelle. La suivie de ce coefficient sous différents débits de vapeur n'a pas été possible. La diffusion continue de vapeur a conduit à la création d'un coussin d'air entre la semelle et le tissu rendant impossible de lire la vraie mesure due à la haute fluctuation des mesures de force prélevées et qui est causée par la perturbation présente à la surface de tissu et sous la semelle du fer.

Les mesures de force d'adhésion statique établies par notre système développé intégrant la machine MTS nous ont permis de déterminer les coefficients de frottement qui correspondent aux coefficients directeurs des droites de tendance de force d'adhésion statique en fonction de force normale pour une température de semelle du fer constante. Un exemple de mesure des forces d'adhésion statique du fer à repasser sur le tissu en lin avec les courbes de tendances est à l'appui sur la figure 3. 12.

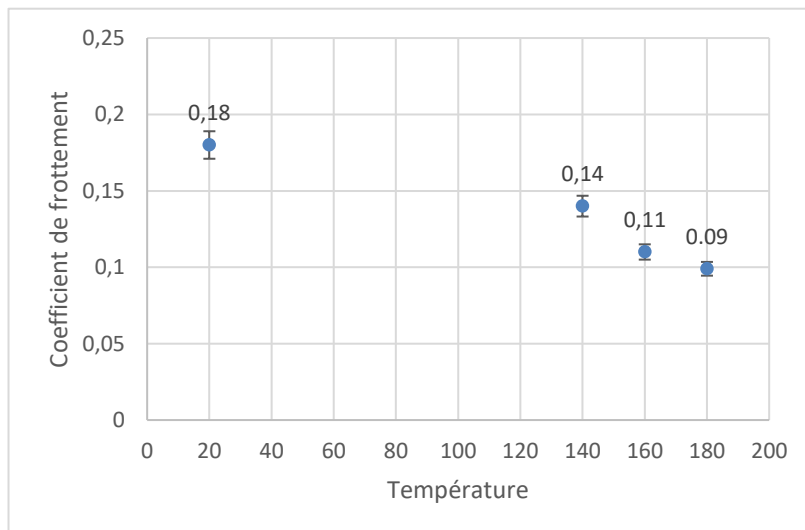


**Figure 3. 12** Force d'adhésion statique sous différentes forces normales et températures entre la semelle du fer et le tissu en lin.

Les valeurs de coefficient de frottement sous différentes températures obtenues à partir des coefficients directeurs pour les deux tissus de coton et de lin contre la semelle du fer sont données sur les figures 3. 13 et 14.



**Figure 3. 13** Coefficient de frottement de tissu de lin contre la semelle du fer sous différentes températures.



**Figure 3. 14** Coefficient de frottement de tissu de coton 2 contre la semelle du fer sous différentes températures.

Le PTFE (polytétrafluoroéthylène) possède l'un des coefficients de friction les plus faibles de tous les solides connus. Lorsqu'il est utilisé comme matériau de revêtement, qui est le cas pour notre semelle du fer à repasser, le coefficient de frottement est généralement compris entre 0,05 et 0,2 [105]. Cela explique les faibles coefficients de frottement mesurés pour les tissus de coton et de lin contre la semelle qui varient entre 0,09 et 0,2 en fonction de températures et à vitesse constante de 500 mm/min.

Ces résultats nous permettent de conclure que le coefficient de frottement de la semelle contre des tissus textiles cellulosique a tendance à diminuer en augmentant la température de la semelle du fer à repasser. On peut dire autrement que la chaleur émise par la semelle conduit à un

changement d'état de surface du textile en le rendant plus aplati et plus lisse d'où un coefficient de frottement plus faible et un glissement plus facile du fer à repasser. Ce système de mesure fut encore avantageux comme il permet d'évaluer le coefficient de frottement sous différentes températures ce qui explicite la tribologie des étoffes en temps réelle au cours du repassage.

### 3.2. Evaluation par traitement d'image

Les calculs de pourcentages des surfaces en pixels noirs par rapport à la surface totale obtenus par le logiciel ImageJ des images traitées avant et après repassage sont donnés sur le tableau 5.

On a présenté ainsi un exemple des images traitées des tissus avant repassage, qui ont été froissé avec la méthode cylindre creux, et après repassage sans vapeur sur le tableau 6. Le reste des images traitées des échantillons repassés avec vapeur 1 et vapeur 2 sont illustrés dans la partie Annex 1 sur les tableaux A.1 et A.2. Sachant que V1 et V2 représentent les débits de vapeurs V1 : débit de vapeur 125 g/min et 150g/min pour V2.

On constate sur les images qui ont été traitées pour les tissus 1 et 3 après repassage ne peuvent pas être exploitables car on voit bien que les pixels noirs ne représentent pas forcément les zones de froissement. Cette confusion de traitement est dû à la couleur de tissu qui n'est pas blanche ou de nuance très claire contrairement aux autres tissus blanc (2 et 4) où la technique de traitement d'image est réussie. Donc on peut conclure que cette méthode d'évaluation de surface n'est applicable que pour les tissus de nuance très claire ou blanche.

**Tableau 5:** Pourcentage de pixels noirs par rapport la surface totale des images traitées des tissus avant et après repassage



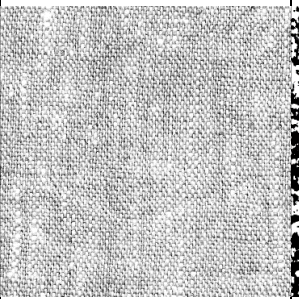





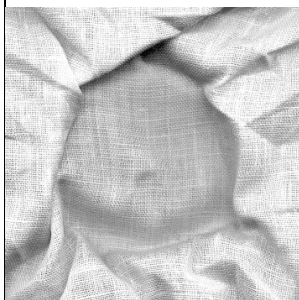

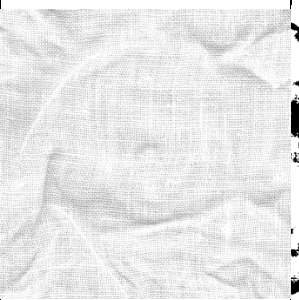







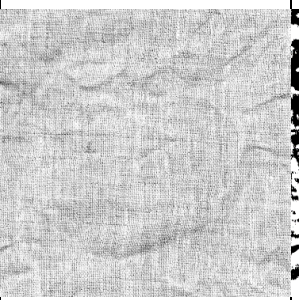





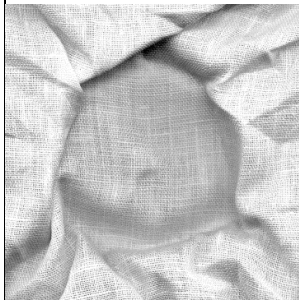

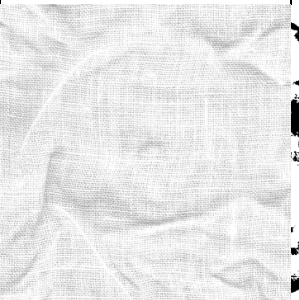





	<b>Avant repassage</b>	<b>Repassé sans vapeur</b>	<b>Repassé à vapeur 1</b>	<b>Repassé à vapeur 2</b>
<b>Tissu 1</b>	45 ±3%	-	-	-
<b>Tissu2</b>	47 ±3%	16± 1%	12 ± 1%	13 ± 1%
<b>Tissu 3</b>	47 ±2%	-	-	-
<b>Tissu 4</b>	39 ±3%	11 ± 2%	8 ± 3%	9 ± 0,4%

En général, on peut observer du tableau 5 qu'avec le repassage avec vapeur nous obtenons des taux de froissement plus faible que celui sans vapeur pour les deux tissus. Cependant, pour le repassage avec vapeur avec deux débits différents, on ne voit pas une grande différence sur les résultats d'éliminations de zones de froissement. Ce qui est du probablement à la faible précision de cette méthode de traitement d'image.

Comme nous pouvons le voir sur le tableau 5, la méthode de traitement d'image nous a permis de déterminer des taux de froissement réguliers avec une faible valeur de déviation standard. Mais cette méthode prend beaucoup de temps vu le nombre d'étapes de traitements et limitée par la nuance de tissu à évaluer.



**Tableau 6 :** Exemples des images avant et après traitement de différents tissus dans deux conditionnements: avant repassage et après repassage sans vapeur

		<b>Tissu froissé avant repassage</b>		<b>Tissus repassés sans vapeur</b>	
		<b>Image Acquise</b>	<b>Image traitée</b>	<b>Image Acquise</b>	<b>Image traitée</b>
<b>Tissu 1</b>					
					
<b>Tissu 2</b>					
					
<b>Tissu 3</b>					
					
<b>Tissu 1</b>					
					



### 3.3. Evaluation des surfaces textiles par scan 3D

Pour cette partie d'étude, on a appliqué un certain conditionnement pour chaque tissu avant repassage et au cours de repassage afin d'identifier le meilleur conditionnement pour un bon repassage tout en évaluant la surface de textile objectivement par le scan 3D. Le bilan de conditionnement appliqué est présenté sur le tableau 7 :

**Tableau 7:** Conditionnement de repassage

	Froissé à sec	Froissé à l'état humide	Repasé sans vapeur	Repasé avec vapeur	Non humidifié avant repassage	Humidifié avant repassage
<b>1</b>	x		x		x	
<b>2</b>	x		x			x
<b>3</b>	x			x	x	
<b>4</b>	x			x		x
<b>5</b>		x	x		x	
<b>6</b>		x	x			x
<b>7</b>		x		x	x	
<b>8</b>		x		x		x

Les calculs des données collectés par le scanneur 3D et traité par le logiciel GOM sont présentés sur les deux tableaux 8 et 9 pour les tissus de coton et de lin respectivement.

**Tableau 8:** Résultats du scan 3D de tissu de coton

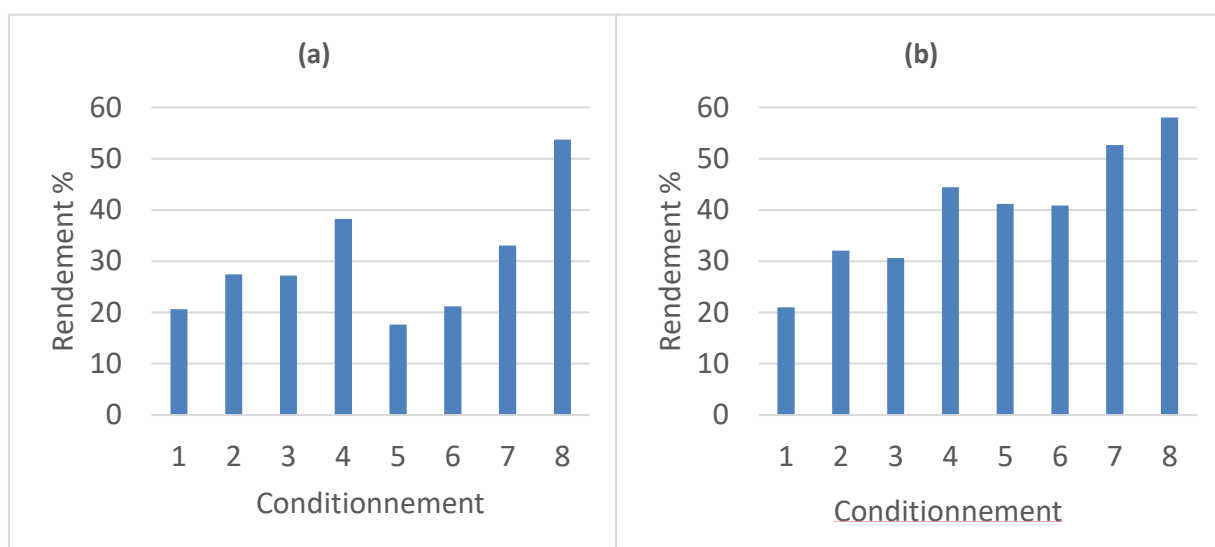
Conditionnement	1	2	3	4	5	6	7	8
<b><math>R_{z1}</math> avant repassage</b>	0.31 ±3%	0.29 ±2%	0.34 ±2%	0.46 ±3%	0.45 ±2%	0.41 ±3%	0.44 ±4%	0.47 ±4%
<b><math>R_{z2}</math> après repassage</b>	0.25 ±2%	0.19 ±3%	0.23 ±2%	0.25 ±3%	0.26 ±3%	0.24 ±4%	0.2 ±3%	0.19 ±4%
<b><math>V_{z1}</math> (mm<sup>3</sup>) avant repassage</b>	1280 ±5%	989 ±3%	1500 ±5%	1191 ±4%	1169 ±4%	1067 ±4%	1236 ±5%	1689 ±6%
<b><math>V_{z2}</math> (mm<sup>3</sup>) après repassage</b>	1016 ±4%	717 ±3%	1092 ±4%	735 ±3%	963 ±3%	841 ±2%	828 ±4%	782 ±3%

**Tableau 9:** Résultats du scan 3D de tissu de lin

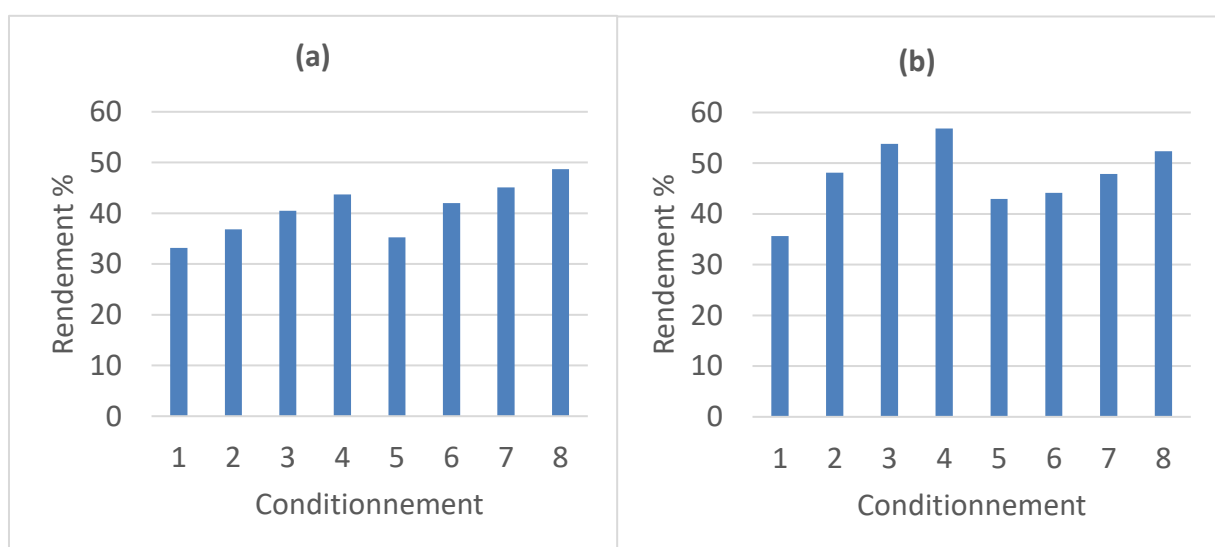
Conditionnement	1	2	3	4	5	6	7	8
<b><math>R_z</math> avant repassage</b>	0.46 ±2%	1.19 ±4%	0.89 ±3%	0.42 ±3%	0.72 ±4%	0.34 ±1%	1.23 ±5%	1 ±4%
<b><math>R_z</math> après repassage</b>	0.34 ±3%	0.19 ±2%	0.19 ±2%	0.15 ±1%	0.52 ±3%	0.19 ±2%	0.47 ±3%	0.52 ±3%
<b><math>V_z</math> (mm<sup>3</sup>) avant repassage</b>	1785 ±4%	7690 ±6%	4014 ±5%	1541 ±3%	4050 ±5%	1242 ±2%	8243 ±4%	4919 ±5%
<b><math>V_z</math> (mm<sup>3</sup>) après repassage</b>	1287 ±3%	841 ±2%	745 ±2%	622 ±2%	2707 ±4%	711 ±2%	2187 ±3%	2310 ±4%

On peut voir sur les deux tableaux 8 et 9 que les variations des valeurs de rugosité de surface textile et les volumes de froissement sont très faibles. Ce qui indique que notre méthode d'évaluation objective est reproductible et fiable. Contrairement à la méthode d'évaluation de surface par traitement d'image, le scan 3D nous permet de juger et quantifier l'état de surface des textiles sans l'interférence et la perturbation d'acquisition de données par la contexture, la nuance de l'étoffe et la lumière ambiante.

Pour pouvoir interpréter et comparer entre les différentes mesures obtenues, on a calculé les rendements de repassage sur la diminution de rugosité et de volume de froissement des étoffes repassées selon chaque conditionnement qui sont présentés sur les figures 3. 15 et 16.



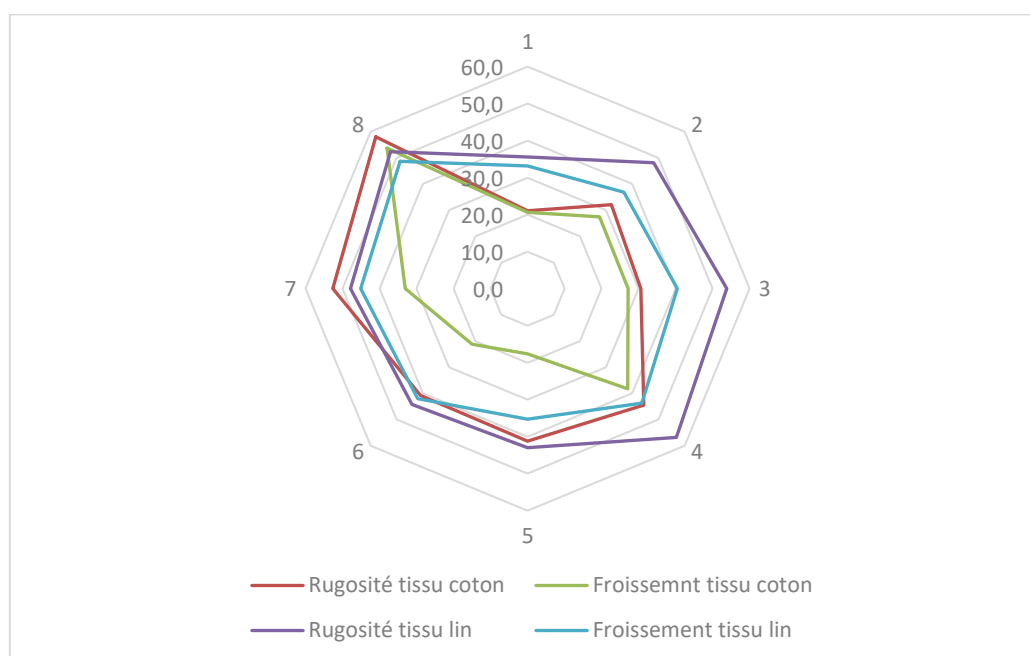
**Figure 3. 15** Rendement de repassage sur la diminution de volume de froissement (a) et de la rugosité (b) de tissu de coton.



**Figure 3. 16** Rendement de repassage sur la diminution de volume de froissement (a) et de la rugosité (b) de tissu de lin.

À première vue, on aperçoit que les rendements d'élimination de froissement et de rugosité des tissus de coton et lin suivent presque la même évolution. Dans le cas général, les rendements sont plus élevés pour la rugosité que pour le défroissement ce que veut dire que le repassage a légèrement plus d'impact sur la rugosité que le défroissement.

Maintenant si on souhaite identifier le conditionnement le plus optimale pour le repassage, on peut s'appuyer sur le graphe en étoile illustré sur la figure 3. 17 où on constate que globalement les conditionnement N°4 et 8 représentent tous les deux les rendements les plus élevés. Ces deux conditionnements consistent au même procédé de repassage : humidifier le tissu avant repassage et ensuite le repasser avec vapeur. Evidemment, le conditionnement N° 8 est le plus optimale selon les résultats car les tissus ont été froissés en état humide, ce qui génère plus de froissement que le froissement à l'état sec, le cas de conditionnement N°4, par conséquence plus de défroissement et plus de rendement.



**Figure 3. 17** Représentation en graphes en étoile des rendements d'éliminations de froissement et de rugosité selon chaque conditionnement.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évalué le comportement hygroscopique des étoffes à base de fibres cellulosiques. Dans un premier temps, on a constaté que la déshydratation des échantillons et qui consiste à rompre les liaisons hydrogènes est plus rapide à des températures plus hautes et chez les tissus les plus légers. Comme on a pu voir que ces matériaux, une fois à l'état sec, sont capables d'adsorber l'humidité rapidement dans des conditions standards d'humidité et de température. Cette reprise en humidité est la principale raison de l'auto froissement des

matériaux textiles cellulosiques comme on va le démontrer dans le chapitre 4. De plus, on a pu observer l'effet plastifiant de la présence d'humidité au sein des fibres cellulosiques en baissant sa  $T_g$  rendant le matériau plus malléable à des températures plus basses. D'où on a pensé à humidifier les étoffes textiles avant repassage afin de baisser la température de transition vitreuse et faciliter par la suite l'opération de repassage.

Nous avons proposé, dans ce chapitre, des méthodes objectives d'évaluation de surface. La méthode de scan 3D développée dans cette étude nous semble la plus avantageuse : elle est fiable, rapide et ne se limite pas à certaines contextures et couleurs de tissu comme le cas de la technique de traitement d'image. Quant à la méthode de mesure de coefficient de frottement de surface textile contre la semelle, elle a pu nous montrer l'effet de la température sur la surface textile. Par contre si on souhaite seulement évaluer le froissement de surface, cette méthode est défavorable car l'état de surface peut être changé et déformé par la pression de la semelle sur le textile.

Grâce à l'évaluation de surface par scan 3D, on a réussi à déterminer le conditionnement et la procédure les plus rentables pour un bon repassage et qui consiste à humidifier légèrement le tissu avant repassage et de le repasser ensuite avec vapeur. Ce résultat met en évidence l'importance de faire baisser la  $T_g$  du matériau avant la déformation de la surface pour avoir une application plus facile et une surface de textile bien aplatie.

## **CHAPITRE 4**

### **Modélisation de la relaxation des étoffes cellulosiques et du transfert thermique dans le cas de repassage**

## Table des matières

Introduction .....	104
1. Étude du comportement mécanique en mode relaxation post-repassage des textiles cellulosiques .....	104
1.1 Retrait dimensionnel et relaxation des contraintes résiduelles post-repassage.	104
1.2 Évaluation de surface par scan 3D.....	106
1.3 Exploitation des résultats expérimentaux et analyse de la relaxation des contraintes résiduelles.....	108
2. Étude de transfert de chaleur dans le repassage.....	111
2.1 Mesures de la température des surfaces.....	111
2.2 Approche mathématique du transfert de chaleur dans le cas de repassage.....	115
2.3 Exemples d'application de l'approche mathématique .....	119

## Table des illustrations

<b>Figure 4. 1</b> Images numériques Coton 2 : (a) juste après repassage et (b) 24h après repassage ; Lin : (c) juste après repassage et (d).....	105
<b>Figure 4. 2</b> Exemple des scans 3D des échantillons en tissu de coton, (a) avant repassage, (b) après repassage, (c) 24 h après repassage. ....	106
<b>Figure 4. 3</b> Courbes de relaxation des tissus de coton2 (a) et du lin (b) repassé sans vapeur (-) et repassé avec vapeur (-).....	108
<b>Figure 4. 4</b> (a) Diagramme schématique du modèle à base d'éléments de Maxwell à cinq composants utilisant des données expérimentales (b) Courbe de relaxation expérimentale avec le modèle ajusté pour un échantillon en lin repassé à vapeur. ....	109
<b>Figure 4. 5</b> (a) Profil de température de la surface de la semelle en fonction de temps en différents points de mesures (b). ....	112
<b>Figure 4. 6</b> Profil de température de deux surfaces : surface de semelle (-) et surface de tissu en coton côté caméra thermique (-) en différents points de mesures. ....	113
<b>Figure 4. 7</b> Écart de température entre les deux surfaces pour chaque pic de température. .	114
<b>Figure 4. 8</b> Le déphasage temporel entre la semelle et le tissu de coton entre deux pics de chaleurs respectifs de chaque profil de température. ....	115
<b>Figure 4. 9</b> Schéma du transfert de chaleur à travers les épaisseurs du tissu et du matelas. .	116
<b>Figure 4. 10</b> Profil de température au sein de tissu de coton à 0.27 mm de profondeur de la semelle du fer. ....	120
<b>Figure 4. 11</b> Profils des températures dans les interfaces tissu-matelas de repassage en fonction de temps et de profondeur. ....	121
<b>Figure 4. 12</b> Les profils de températures en fonction de temps de la face externe de tissu, non en contact avec la semelle du fer.....	122

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Evolution bidimensionnelle des tissus de lin et du coton après repassage .....	106
<b>Tableau 2:</b> Résultats de la numérisation 3D des tissus de coton1 avant et après le repassage .....	107
<b>Tableau 3 :</b> Résultats de la numérisation 3D des issus du lin avant et après le repassage....	107
<b>Tableau 4:</b> Résultats des expériences de relaxation des contraintes. ....	108
<b>Tableau 5:</b> Valeurs des paramètres du modèle et applicabilité aux données expérimentales	110
<b>Tableau 6:</b> Ecart de température et déphasage temporel entre les deux surfaces : semelle et tissu en différents points de surface et pour chaque pic du profil de température .....	114
<b>Tableau 7 :</b> Caractéristiques des interfaces tissu et matelas de repassage.....	119
<b>Tableau 8 :</b> Constantes employées dans le modèle mathématique.....	120

## Introduction

Dans le chapitre trois, nous avons mis en exergue l'étroite corrélation existante entre le facteur humidité et la plupart des propriétés des matériaux cellulosiques et les conséquences qui pouvaient en découler sur le plan morphologique. En effet, la présence d'humidité au sein de ces matériaux influence fortement leurs comportements vis-à-vis des sollicitations thermiques et thermomécaniques comme dans le cas du repassage des étoffes par exemple. Dans ce cas précis, le rôle de l'humidité est fondamental car elle facilite l'opération de repassage des tissus en raison du ramollissement de la phase amorphe par suite de l'abaissement de la  $T_g$ . Le repassage est une sollicitation thermomécanique appliquée aux étoffes qui a pour conséquence la rupture des liaisons intermoléculaires de type hydrogène et de les reformer différemment. La nouvelle distribution de ces liaisons élimine la majorité des plis responsables du froissement de la surface des tissus. L'élimination des plis est d'autant plus facile à réaliser qu'elle est appliquée en combinaison avec de la vapeur d'eau sous pression grâce à l'emploi de centrale à vapeur ou de fer à repasser équipé d'un réservoir d'eau chaude. Outre la disparition des plis par repassage, la redistribution des liaisons hydrogène conduit à des modifications importantes dans les propriétés viscoélastiques des matériaux cellulosiques. Dans ce chapitre, nous étudierons, dans une première étape, la relaxation des contraintes mécaniques résiduelles introduites dans le matériau lors du repassage des textiles en fonction du temps. Nous évaluerons le niveau de reprise de l'état de froissement d'une surface textile après une certaine durée de repos post repassage. Nous proposerons une modélisation analogique du comportement viscoélastique en mode relaxation et nous déterminerons les paramètres du modèle analogique.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous évaluerons la qualité du repassage des textiles en coton et en lin grâce à l'utilisation d'une centrale à vapeur de marque PHILIPS, modèle GC9622/20. La démarche expérimentale consiste à vérifier d'abord l'homogénéité de la température de la semelle du fer à repasser et le débit de vapeur délivré par la centrale. L'étape suivante consistera à mesurer les températures du côté opposé à la face de la semelle, la face envers de l'échantillon textile. Les résultats que nous obtenons permettront d'évaluer la qualité du repassage par la maîtrise du transfert de chaleur à travers l'épaisseur du textile soumis à l'opération de repassage. Nous proposerons une modélisation mathématique permettant de simuler le profil de température dans le textile sur la base des résultats expérimentaux obtenus. Le calcul théorique du transfert chaleur concernera les interfaces : semelle - tissu – matelas (tapis de repassage).

## 1. Étude du comportement mécanique en mode relaxation post-repassage des textiles cellulosiques

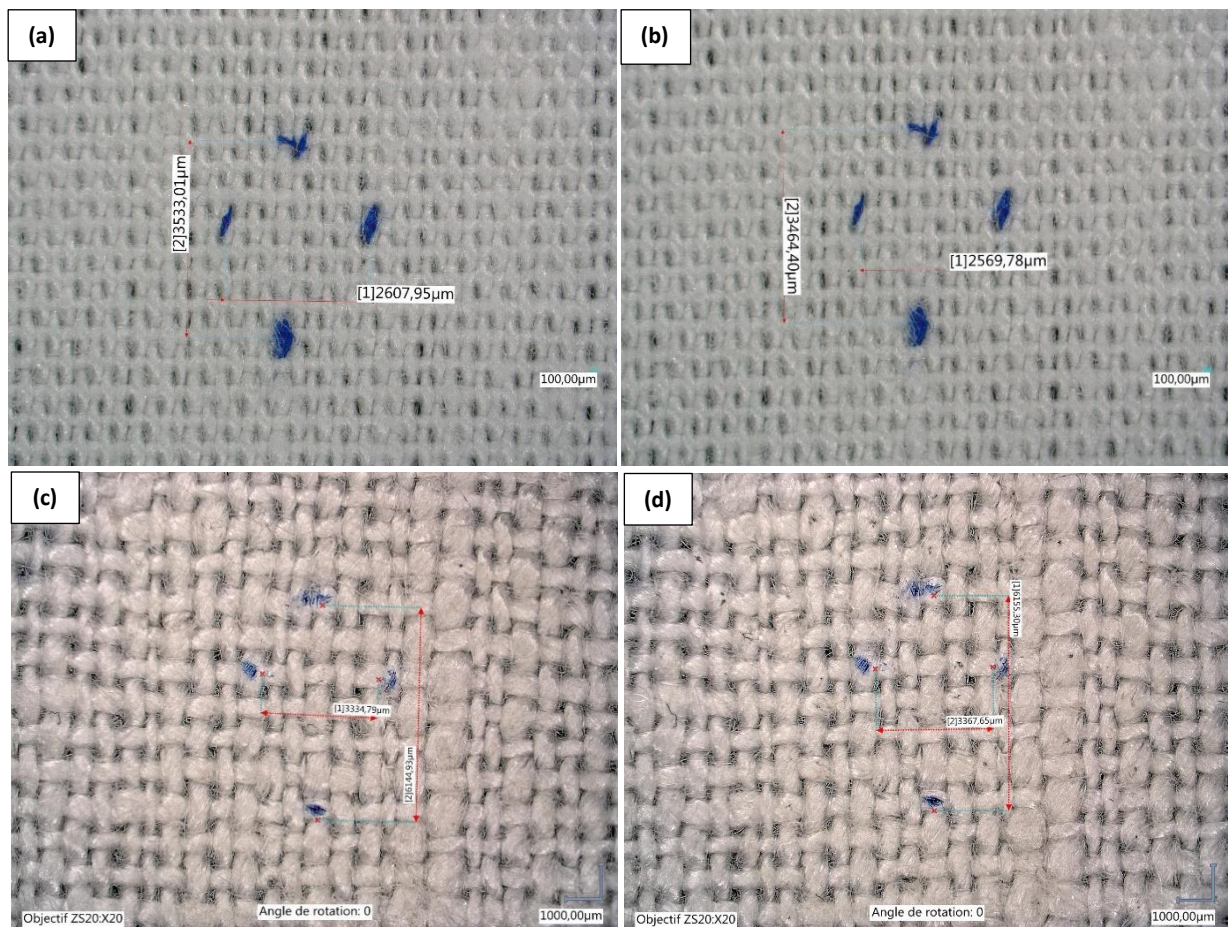
### 1.1 Retrait dimensionnel et relaxation des contraintes résiduelles post-repassage

Afin de mettre en évidence le phénomène de relaxation de contraintes résiduelles internes dans le matériau lors d'une sollicitation thermomécanique, à l'échelle macroscopique, voire microscopique, il suffit simplement d'observer l'évolution dimensionnelle des éprouvettes après repassage. D'après certains auteurs [106, 45] le retrait dimensionnel post opératoire et au repos des éprouvettes peut être associé au phénomène de relaxation de



contraintes résiduelles en fonction du temps. Cette relaxation a pour conséquence d'importantes modifications au niveau de la texture du matériau. A l'échelle macroscopique, on observera des taux de retrait plus ou moins important en fonction de la durée et la température de l'essai. A l'échelle microscopique, on notera des réorientations moléculaires pouvant modifier la morphologie des échantillons textiles [21,45].

Pour ce faire, nous avons préparé des échantillons de forme rectangulaire en coton et en lin de dimensions : 5x5 cm sur lesquels nous avons fixé des points de repérage visibles sur la surface de chaque échantillon, dans les sens chaîne et trame, (voir figure 4. 1). Ces repères sont espacés par une longueur  $L_0$  mesurée après repassage. La distance entre repères devient  $L_f$  après repassage et repos de 24h. La différence entre  $L_0$  et  $L_f$ , rapportée à  $L_0$  représente le taux de retrait dimensionnel de l'éprouvette. Elle exprime, outre les changements d'ordre morphologique, une relaxation mécanique que nous étudierons dans cette partie du chapitre.



**Figure 4. 1** Images numériques Coton 2 : (a) juste après repassage et (b) 24h après repassage ; Lin : (c) juste après repassage et (d)

L'examen des clichés pris au microscope optique montrent un retrait allant de 1 à 1,9% selon les tissus aussi bien dans le sens chaîne que dans le sens trame, 24h après l'opération de repassage (Conf.au tableau 1). Ce retrait est dû à la relaxation des contraintes emmagasinées dans les matériaux qui conduit au retour à un état d'équilibre stable au point de vue dimensionnel et donc à une légère reprise de froissement de la surface des textiles repassés.

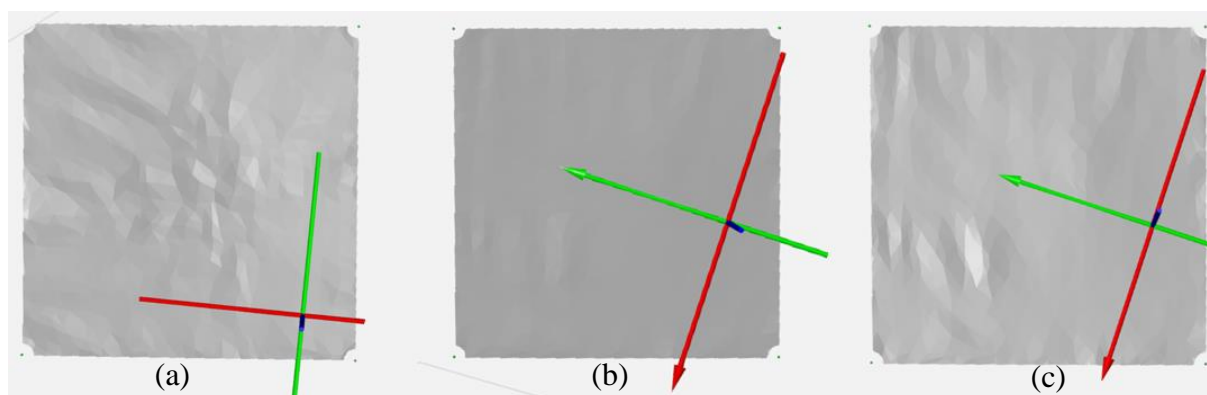
**Tableau 1:** Evolution bidimensionnelle des tissus de lin et du coton après repassage

Tissu	Sens	Dimension en 2D ( $\mu\text{m}$ )	Dimension en 2D ( $\mu\text{m}$ )	Retrait %
		juste après repassage	24 h après repassage	
Coton 2	Chaîne	3533,01	3464,40	1.9
	Trame	2607,95	2569,78	1.5
Lin	Chaîne	6144,93	6055,30	1.5
	Trame	3367,65	3334,79	1.0

Il est à noter que le retrait dans le sens chaîne est plus élevé que dans le sens trame. Cela est probablement dû au fait que les fils de chaîne sont toujours plus tendus que les fils de trame.

### 1.2 Évaluation de surface par scan 3D

L'analyse d'image est l'une des techniques les plus couramment utilisées pour étudier les états de surfaces qu'elles soient textiles ou non. On se limite souvent à l'analyse de clichés uniquement en deux dimensions mais dans certaines situations l'étude d'image en 2D ne suffit pas. Dans ce cas l'analyse doit être étendue à la troisième dimension par balayage numérique des surfaces, Scan 3D. C'est précisément cette technique que nous avons choisie pour l'étude et l'analyse de la topographie des surfaces textiles. Le mode opératoire consiste à effectuer un scan en 3D des éprouvettes à étudier. La méthode permet d'évaluer la rugosité de surface et le volume sous les reliefs de froissement. La combinaison de la rugosité et du volume des reliefs donne une description assez fidèle de la topographie de la surface textile.



**Figure 4. 2** Exemple des scans 3D des échantillons en tissu de coton, (a) avant repassage, (b) après repassage, (c) 24 h après repassage.

Sur la figure 4. 2 on illustre un exemple de 3 scans de même échantillon de tissu : un froissé fig.2(a) ensuite celui qui est scanné juste après repassage fig.2(b) et finalement 24 h après le repassage fig.2(c). On observe qu'après repassage il y a quelques reliefs qui restent mais qui sont très minimes. Après 24 h ces reliefs sont accentués avec l'apparition des nouveaux reliefs. Ces nouvelles zones de froissement ne sont pas obligatoirement les mêmes zones de froissement d'avant repassage.

Le rapport de rugosité et les volumes du froissement des tissus de coton et de lin au cours de temps et en différents modes de repassage obtenus par balayage 3D sont déterminés comme il

a été présenté précédemment dans le chapitre 2 (éq II.5 et II.6). Ces résultats sont reportés dans les tableaux 2 et 3 :

**Tableau 2:** Résultats de la numérisation 3D des tissus de coton1 avant et après le repassage

État de surface	Froissé	Repasé sans vapeur		Repasé avec débit de vapeur $V_1^*$		Repasé avec débit de vapeur $V_2^{**}$	
		t = 0	t = 24	t = 0	t = 24	t = 0	t = 24
<b>Temps de repos (h)</b>							
<b>Taux de rugosité <math>\pm cv\%</math></b>	0.4 $\pm 11\%$	0.29 $\pm 5\%$	0.36 $\pm 5\%$	0.21 $\pm 4\%$	0.27 $\pm 6\%$	0.25 $\pm 3\%$	0.34 $\pm 6\%$
<b>Volume de froissement (<math>mm^3</math>) <math>\pm cv\%</math></b>	1433 $\pm 12\%$	845 $\pm 5\%$	905 $\pm 5\%$	664 $\pm 5\%$	720 $\pm 6\%$	830 $\pm 7\%$	970 $\pm 8\%$

\*  $V_1$  : débit de vapeur 125 g/min. \*\* $V_2$  : débit de vapeur 150g/min.

**Tableau 3:** Résultats de la numérisation 3D des issus du lin avant et après le repassage

État de surface	Froissé	Repasé sans vapeur		Repasé avec débit de vapeur $V_1$		Repasé avec débit de vapeur $V_2$	
		t = 0	t = 24	t = 0	t = 24	t = 0	t = 24
<b>Temps de repos(h)</b>							
<b>Taux de rugosité <math>\pm cv\%</math></b>	0.46 $\pm 12\%$	0.3 $\pm 6\%$	0.4 $\pm 5\%$	0.24 $\pm 5\%$	0.3 $\pm 6\%$	0.29 $\pm 5\%$	0.4 $\pm 7\%$
<b>Volume de froissement (<math>mm^3</math>) <math>\pm cv\%</math></b>	1618 $\pm 12\%$	1022 $\pm 5\%$	1036 $\pm 5\%$	797 $\pm 12$	820 $\pm 17\%$	952 $\pm 6\%$	1015 $\pm 6\%$

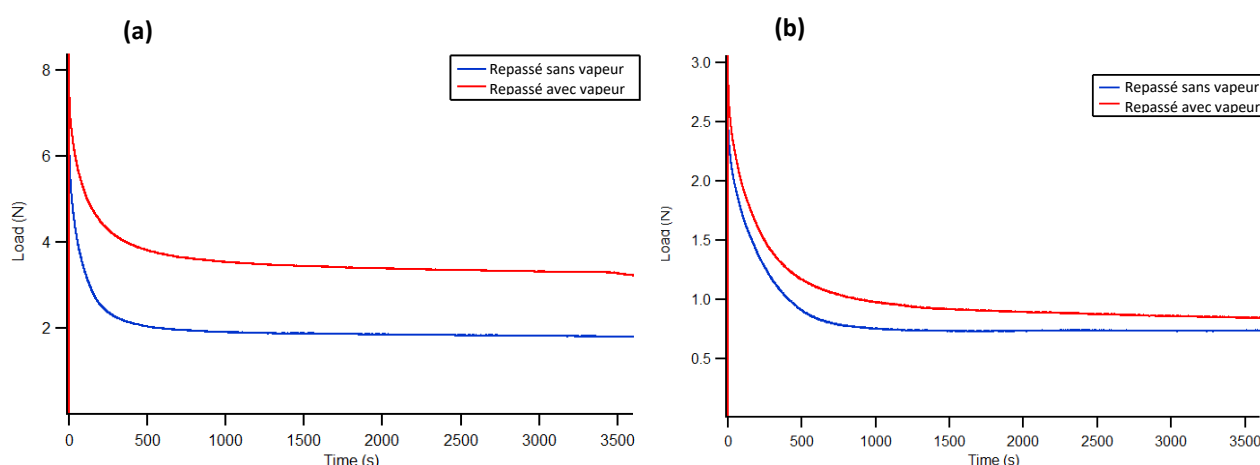
À première vue, nous constatons que 24 heures après le repassage, il y a une augmentation des valeurs de taux de rugosité et du volume de froissement quel que soit le mode de repassage pour les deux types de tissus. Cette constatation confirme bien le phénomène de relaxation au sein des tissus cellulosiques après le repassage, entraînant la déformation de la surface et la réapparition des froissements. Cependant, cette relaxation est variable d'un mode de repassage à l'autre. Par exemple, les échantillons qui ont été repassés sans vapeur montrent un léger décalage sur les résultats du scan 3D par rapport aux deux autres modes. En revanche, les échantillons qui ont été repassés avec la vapeur 2, à haut débit de vapeur, présentent la plus forte variation du rapport de rugosité et du volume des froissements. Puisque nous avons appliqué le même processus de repassage (température, pression, nombre de passage, temps...), les échantillons qui ont été repassés avec la vapeur 2 n'étaient pas complètement secs après le repassage par rapport aux autres échantillons. On peut donc dire que l'amplitude de la relaxation dépend de la teneur en humidité au sein du tissu.

Comme le montre les tableaux 2 et 3, l'application de la vapeur pendant le repassage est essentielle pour un bon repassage, mais pour éviter la réapparition des plis, il faut s'assurer que le tissu est complètement sec après le repassage, ce qui est le cas des tissus qui ont été repassés sans vapeur, car laisser le tissu humide accélère la reformation des froissements. En d'autres termes, après avoir repassé avec de la vapeur, il est recommandé de faire quelques passages sans vapeur pour sécher le tissu et retarder la relaxation.

### 1.3 Exploitation des résultats expérimentaux et analyse de la relaxation des contraintes résiduelles.

Comme décrit dans le chapitre 2, les essais de relaxation des contraintes internes ont été effectués sur des échantillons issus les tissus coton 2 et lin. Juste avant le début l'essai de relaxation, ces échantillons ont été repassés avec et sans vapeur. Les courbes obtenues sont illustrées sur la figure 4. 3. Les matériaux subissent un abaissement de la contrainte mécanique nominale selon un processus exponentiellement décroissant, c'est le processus de la relaxation des contraintes. D'après la figure 4. 3, ce processus s'effectue selon deux étapes, l'une est très rapide, située entre zéro et 300 secondes. La deuxième étape se poursuit au de-là de 300 secondes et tend vers une valeur asymptotique de la contrainte résiduelle. L'allure des courbes de relaxation, dans tous les cas de figures, suggèrent un processus de relaxation de contraintes caractérisé par deux temps moyens de relaxation, l'un correspond aux temps courts et l'autre aux temps longs de la relaxation.

L'exploitation graphique des courbes expérimentales nous a permis de calculer le module initial de relaxation représenté par la somme de  $E_1 + E_2 + E_\infty$  et le module instantané en fonction du temps  $E(t)$ . Les détails des résultats expérimentaux calculés sont consignés dans le tableau 4.



**Figure 4. 3** Courbes de relaxation des tissus de coton2 (a) et du lin (b) repassé sans vapeur (-) et repassé avec vapeur (-)

**Tableau 4:** Résultats des expériences de relaxation des contraintes.

Tissu	Conditionnement	Module de relaxation initiale (MPa) $\pm$ cv%	Module de relaxation finale (MPa) $\pm$ cv%	Fraction (E finale/ E initiale) $\pm$ cv
Coton 2	Repassé sans vapeur	47.39 $\pm$ 6.5%	12.16 $\pm$ 6%	26 $\pm$ 1%
	Repassé avec vapeur	55.22 $\pm$ 2.15%	22.27 $\pm$ 8.5%	40 $\pm$ 6%
Lin	Repassé sans vapeur	5.89 $\pm$ 0.3%	1.72 $\pm$ 0.4%	29 $\pm$ 0.7%
	Repassé avec vapeur	6.6 $\pm$ 6%	1.97 $\pm$ 5%	30 $\pm$ 7%

Nous notons que les tissus repassés en milieu vapeur se relaxent plus que les tissus repassés à sec.

Afin d’approfondir l’analyse et l’exploitation des courbes de relaxation de la contrainte en fonction du temps, nous nous sommes proposés de modéliser le comportement mécanique par le modèle rhéologique de Maxwell généralisé (voir figure 4. 4). La représentation choisie sur la base des résultats expérimentaux correspond à un modèle à deux éléments de Maxwell et d’un ressort en parallèle. Les ressorts simulent le comportement élastique pur selon la loi de Hooke et le comportement visqueux est donné par la loi de Newton. L’équation mathématique qui décrit notre modèle est donnée par la relation (IV.2).

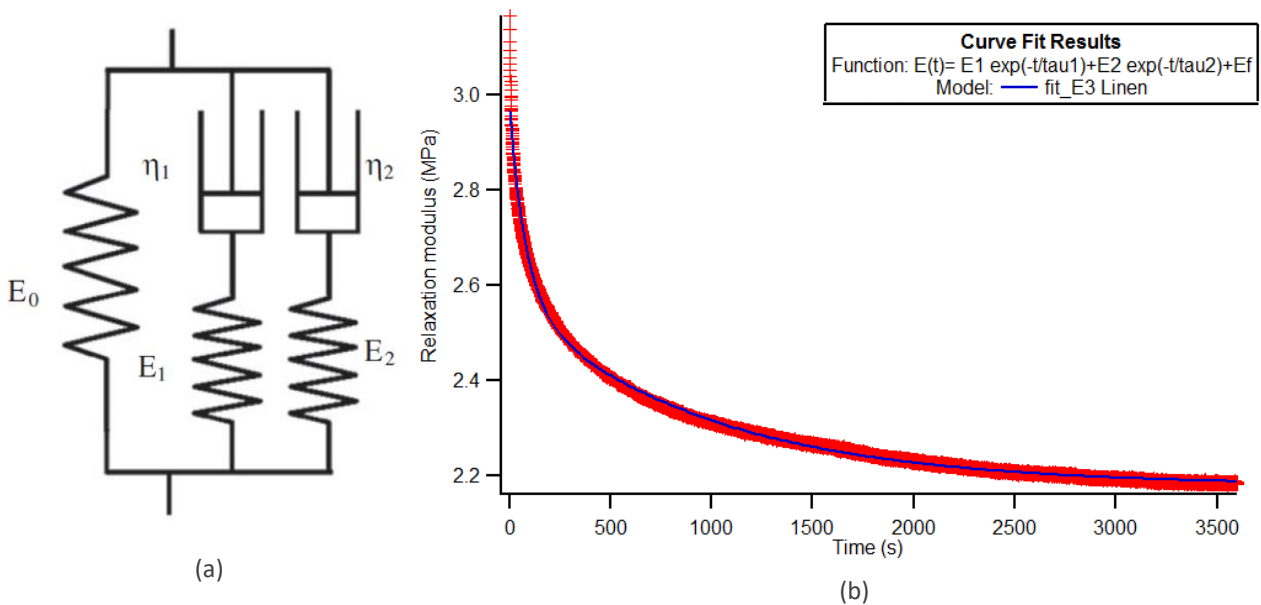
L’application du modèle de Maxwell généralisé choisi, à partir des éléments de bases, nous obtenons une excellente superposition des courbes théoriques avec les courbes expérimentales. Nous pouvons ainsi définir avec une excellente précision les différents paramètres du modèle théorique (Voir Tableau 5), ayant permis la simulation de la relaxation des contraintes en fonction du temps.

$$\sigma(t) = \sigma_{\infty} + \sigma_1 \exp(-t/\tau_1) + \sigma_2 \exp(-t/\tau_2) \quad (IV.1)$$

Ce qui peut aussi s’écrire comme suit :

$$E(t) = E_{\infty} + E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) \quad (IV.2)$$

Les paramètres du modèle analogique  $E_1, E_2, E_{\infty}, \tau_1$  et  $\tau_2$  ont été déterminés à l’aide du logiciel Igor.



**Figure 4. 4** (a) Diagramme schématisé du modèle à base d'éléments de Maxwell à cinq composants utilisant des données expérimentales (b) Courbe de relaxation expérimentale avec le modèle ajusté pour un échantillon en lin repassé à vapeur.



Les paramètres  $E_\infty$ ,  $E_1$  et  $E_2$  représentent le caractère élastique des ressorts qui apparaissent dans le modèle de Maxwell.  $\tau_1$  et  $\tau_2$  sont les constantes de temps de relaxation pour les deux éléments de Maxwell.  $\tau_1$  et  $\tau_2$  sont égaux à  $(\eta_1/E_1)$  et  $(\eta_2/E_2)$  respectivement.

Les paramètres du modèle ont été déterminés grâce au logiciel de calcul *Igor* par itérations jusqu'à l'obtention de valeurs optimales.

Les valeurs des paramètres du modèle sont présentées dans le tableau 5.  $E_2$  et  $\tau_2$  représentent l'élément de Maxwell qui correspond à la chute soudaine et forte de l'effort de traction au début de la déformation constante. La réduction lente et progressive de l'effort de traction due à la structure interne du tissu et à la réorganisation des fibres est représentée par l'autre élément de Maxwell et ses paramètres sont  $E_1$  et  $\tau_1$ . Ainsi,  $\tau_1$  est supérieur à  $\tau_2$ .  $\sigma_\infty = E_\infty \times \varepsilon$  est la contrainte élastique qui subsiste lorsque le plateau de l'état stable est atteint. Les valeurs du modèle obtenues dans notre étude confirment ce raisonnement.

**Tableau 5:** Valeurs des paramètres du modèle et applicabilité aux données expérimentales

	Conditionnement des tissus	$E_\infty$ (MPa)	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\tau_1$ (s)	$\tau_2$ (s)	Module de relaxation initial (Modèle)	Module de relaxation initial (Expérimental)	Module de relaxation final (modèle) = $E_\infty$	Module de relaxation final (Expérimental)
							$E_\infty + E_1 + E_2$	(Expérimental)		
Coton 2	Repasé sans vapeur	12.16	8.1	26.46	294	45	46.72 MPa	47.39 MPa	12.16 MPa	12.16 MPa
	Repasé avec vapeur	22.26	10.68	21.33	651	88	54.3 MPa	55.26 MPa	22.26 MPa	22.269 MPa
Lin	Repasé sans vapeur	1.71	2.20	1.49	230	210	5.4 MPa	5.88 MPa	1.71 MPa	1.71 MPa
	Repasé avec vapeur	2.19	0.40	0.43	615	145	3.02 MPa	3.24 MPa	2.19 MPa	2.20 MPa

D'après le tableau 5, nous pouvons remarquer que les échantillons repassés sans vapeur, dont les modules de relaxation sont plus faibles, la relaxation a été plus rapide que celle des tissus repassés à la vapeur. Autrement dit, avec un repassage sans vapeur les tissus cellulosiques ont tendance à retourner vers un état plus stable plus rapidement. En effet, les liaisons hydrogène détruites par la chaleur de la semelle du fer sans remplacer les nouvelles liaisons par la vapeur sont rétablies rapidement par la présence de molécules d'eau dans l'atmosphère. Alors que les échantillons repassés à la vapeur, avec faible densité en groupe hydroxyles libres, ont tendance à se relaxer plus lentement.

Le grand écart entre les modules de relaxation des tissus en coton et ceux des tissus en lin pour refléter que le repassage appliqué est plus impactant sur le coton que le lin. Donc si on souhaite avoir le même ordre de module de relaxation et que le repassage soit plus impactant sur le lin on doit monter dans la température de repassage. D'ailleurs on trouve sur le marché quelques centrales vapeurs ou fer à repasser qui recommandent de repasser le lin avec une température supérieure à celle utilisée pour le coton.

Malheureusement, la corrélation entre les résultats du test de relaxation et l'évaluation 3D n'est pas possible car la forme de l'échantillon et le taux d'humidité ne sont pas les mêmes dans les deux méthodes. Bien que nous puissions clairement voir, à partir des deux analyses, que le repassage sans vapeur n'est pas optimal dans deux cas :

Le scan 3D a montré que le repassage à sec n'éliminait pas autant les froissements que le repassage à la vapeur.

La réapparition des froissements, même si elle est insignifiante, a plus de chances de se produire et de manière plus rapide avec des tissus repassés sans vapeur et des tissus encore humides après repassage.

## **Conclusion**

Cette partie d'étude de relaxation des tissus en coton et lin nous a permis d'observer de près le déroulement de ce phénomène après le repassage au cours de temps. L'état déformé après repassage n'est pas stable dans le temps et un retour à un état partiellement déformé d'un tissu sans intervention extérieure est possible. Cette relaxation peut se manifester sous forme de retrait ou sous forme des reliefs de froissement qui réapparaissent après un certain temps de repassage.

La déformation générée dans la structure du tissu dépend de la température, de la pression et de l'humidité, qui influent sur le retard ou l'accélération de la relaxation des contraintes. Plus cette déformation est importante, plus la relaxation des contraintes est importante et vice-versa. Ce phénomène ne peut être observé que pour une déformation plastique, ce qui le rend réversible. Il faut noter qu'avec une déformation très élevée, on peut risquer une déformation ou un pli permanent [107].

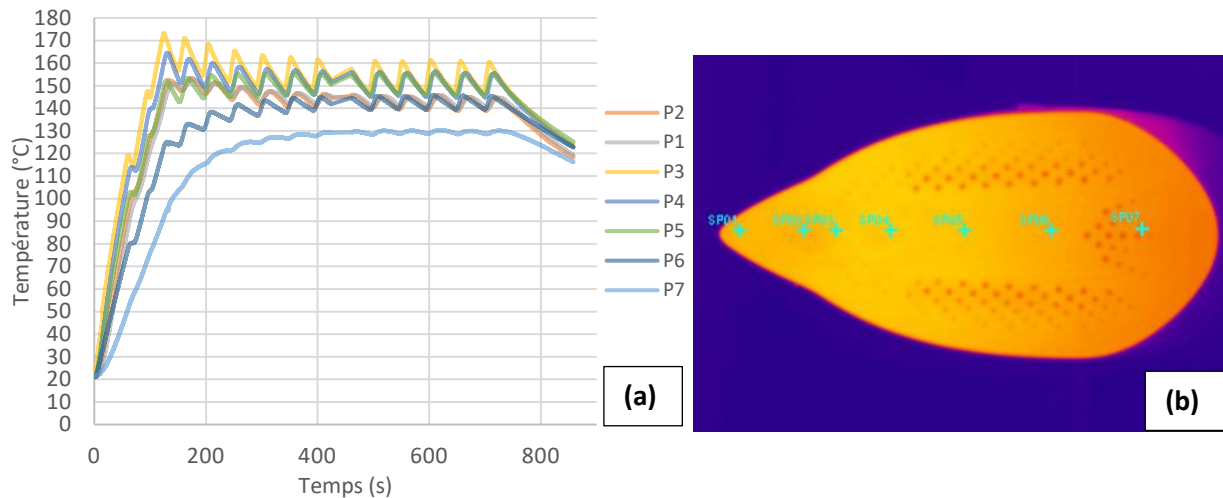
Les résultats du suivi de la relaxation des contraintes mécaniques des tissus de coton et de lin repassés ont montré que la relaxation se déroule en deux étapes et peut être modélisée par un modèle mécanique analogique de type Maxwell avec deux temps de relaxation. On peut également conclure que le repassage à la vapeur, avec un tissu complètement sec après le repassage, peut nous conduire à une relaxation des contraintes retardée et plus lente par rapport au repassage sans vapeur. Par conséquent, la réapparition des plis dans le temps sur un tissu à base de cellulose est plus lente avec un pressage à la vapeur et un stockage dans un environnement sec par la suite.

## **2. Étude de transfert de chaleur dans le repassage**

### **2.1 Mesures de la température des surfaces**

Afin de quantifier le transfert de chaleur de la semelle du fer à repasser au textile nous avons utilisé une caméra thermique. La démarche expérimentale consiste à mesurer la température de la surface de semelle et celle de l'envers du textile plaqué contre la semelle. Nous avons, d'abord, procédé à la vérification de l'homogénéité de la température à la surface de la semelle lors de la mise en service du fer à repasser. Cette étape a permis de mettre en évidence sept zones de température différentes repérées par les points  $P_1$ ,  $P_2$ , ... $P_7$  comme le montre la figure

4. 5.b. La montée en température jusqu'au plateau de repassage des différentes zones de la semelle suit la cinétique indiquée sur la figure 4. 5.a. Chaque courbe correspond à l'évolution de la température d'une zone précise. On constate que le point P<sub>1</sub> est le plus chaud et P<sub>7</sub> le plus froid. L'écart le plus important, entre P<sub>1</sub> et P<sub>7</sub>, atteint une trentaine de degrés. Les zones les plus uniformes en température sont celles situées entre P<sub>1</sub> et P<sub>5</sub>.



**Figure 4. 5** (a) Profil de température de la surface de la semelle en fonction de temps en différents points de mesures (b).

Les oscillations que l'on observe sur les différentes courbes de la figure 4. 5.a sont générées par le système de régulation *PID* (*proportionnel, intégral, dérivé*) du fer à repasser. Ce système permet le contrôle et l'amélioration des performances de l'asservissement du fer à repasser. Cette oscillation est plus apparente sur les profils en points 3 et 4 avec les températures les plus élevées par rapport le reste des profils. Ce qui indique que la bobine de chauffe est située plus au moins dans cette zone (autour des points 3 et 4).

Cependant la mesure de température de surface de la semelle en point 7 montre un profil avec des oscillations très amorties. On estime que c'est dû au fait que cette zone est un peu éloignée d'élément chauffant vu que la température est plus basse en ce point.

Après avoir étalonné en température la semelle du fer à repasser, nous avons réalisé une série de mesures sur tissu en coton mis en contact direct avec la surface de la semelle portée à la température de repassage. Les prises de températures ont été réalisées sur la surface du textile qui est en face à la caméra thermique, figure 4. 5.b, et aux points repères P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, ...P<sub>7</sub>.

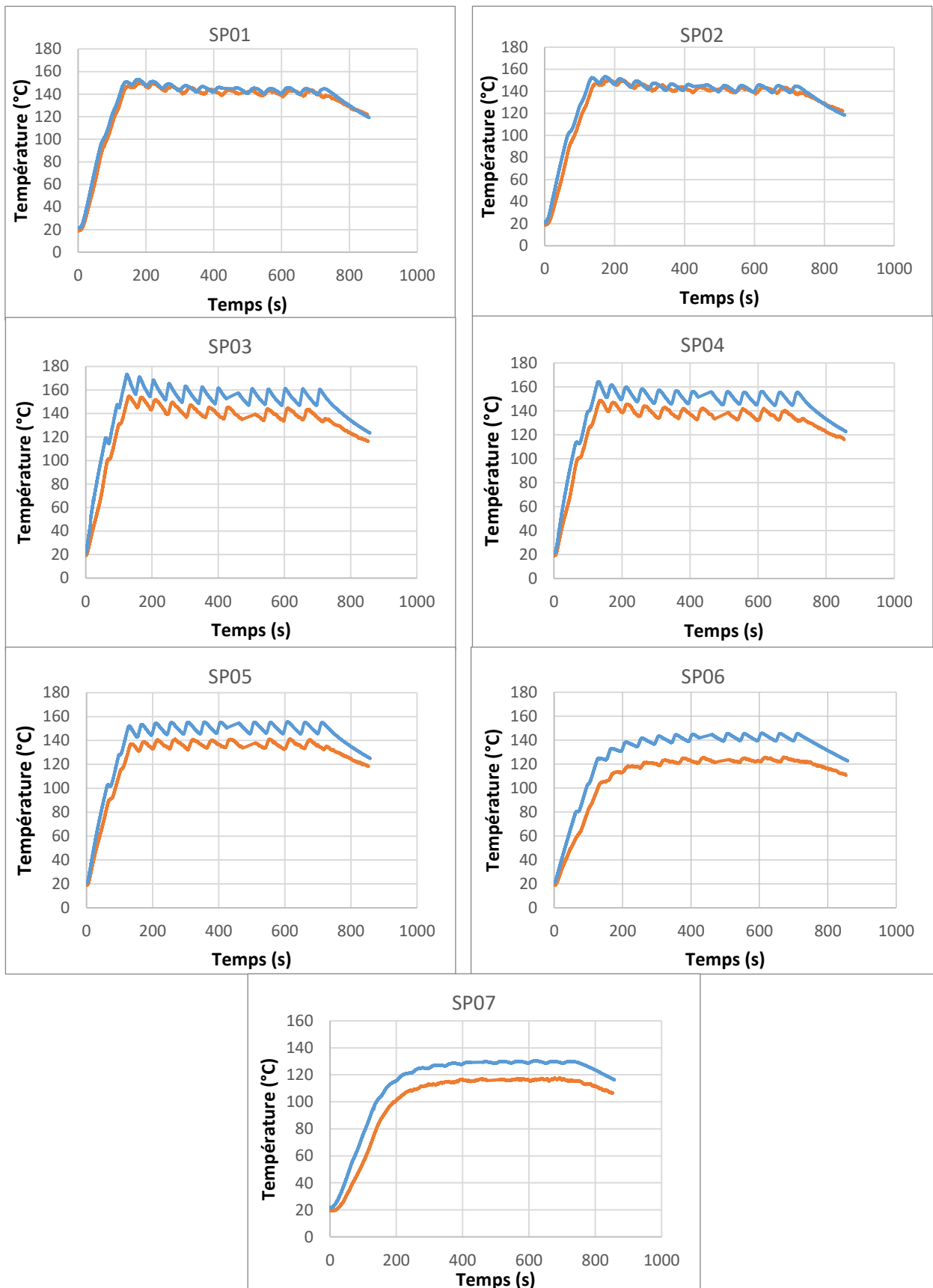
Les résultats de mesures de température ont été reportés par couple tissu-semelle sur les figures 4. 6.1 à 6.7.

Dans tous les cas de figures la température de surface du tissu est toujours plus faible que celle de la surface de la semelle. IL est à noter que la température du plateau de repassage est atteinte au bout de 150 secondes pour les points P<sub>1</sub> à P<sub>5</sub> et après 200 secondes pour P<sub>6</sub> et P<sub>7</sub>.

Dans le tableau 6, on présente les écarts de températures  $\Delta T$  entre deux pics de température pour les deux courbes de chaque point aussi que les déphasages temporels qui correspondent



au temps nécessaire pour que le pic de température émis par la semelle est atteint sur la surface de tissu. Les différents résultats sont résumés sur les figures 4. 7 et 4. 8.

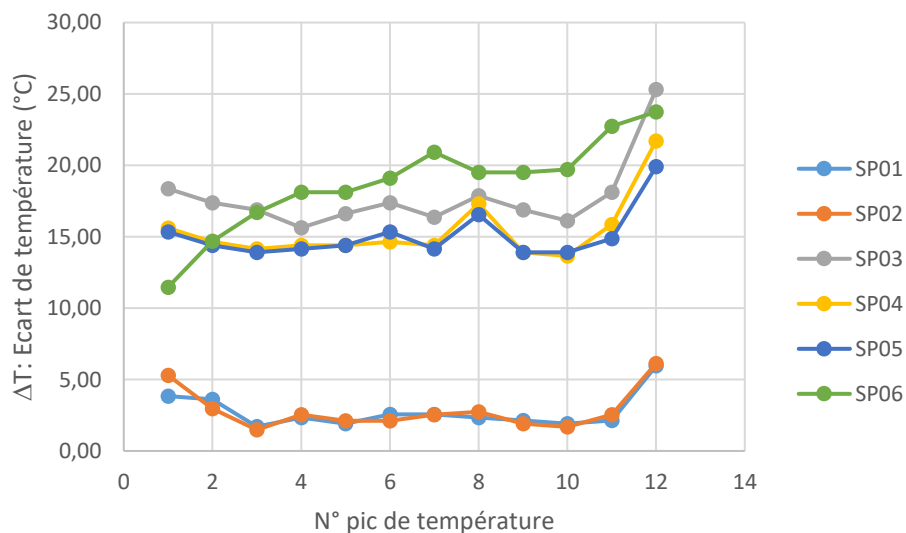


**Figure 4. 6** Profil de température de deux surfaces : surface de semelle (-) et surface de tissu en coton côté caméra thermique (-) en différents points de mesures.

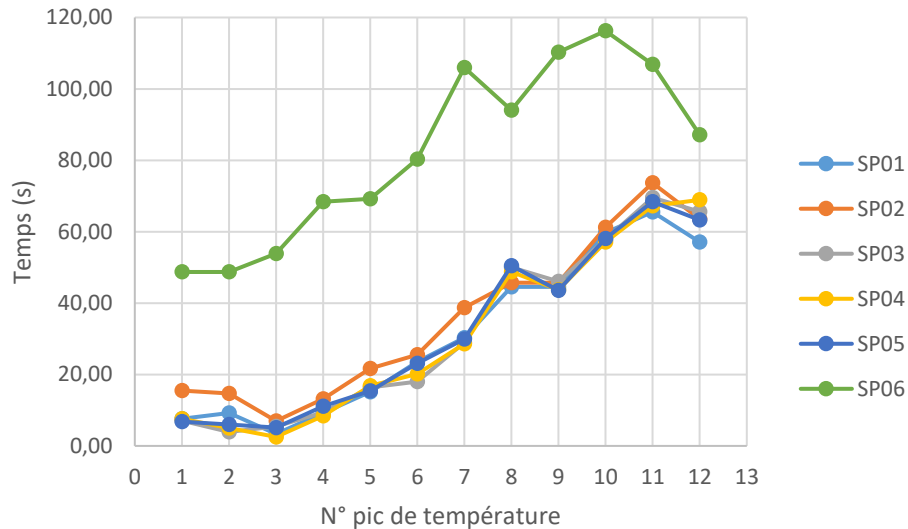
**Tableau 6:** Ecart de température et déphasage temporel entre les deux surfaces : semelle et tissu en différents points de surface et pour chaque pic du profil de température

N° Pic	SP01		SP02		SP03		SP04		SP05		SP06	
	$\Delta t$ (s)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta t$ (s)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta t$ (s)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta t$ (s)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta t$ (s)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta t$ (s)	$\Delta T$ (°C)
1	7.56	3.83	15.50	5.29	7.03	18.36	7.56	15.61	6.84	15.35	48.72	11.47
2	9.24	3.62	14.73	2.96	3.91	17.37	5.04	14.63	5.98	14.39	48.72	14.69
3	3.36	1.70	6.98	1.48	5.47	16.87	2.52	14.15	5.13	13.91	53.85	16.70
4	9.24	2.34	13.18	2.54	9.38	15.63	8.40	14.39	11.11	14.15	68.38	18.11
5	15.13	1.91	21.71	2.11	16.41	16.63	16.81	14.39	15.38	14.39	69.23	18.11
6	23.53	2.55	25.58	2.11	17.97	17.37	20.17	14.63	23.08	15.35	80.34	19.11
7	30.25	2.55	38.76	2.54	28.91	16.38	28.57	14.39	29.91	14.15	105.98	20.93
8	44.54	2.34	45.74	2.75	50.00	17.87	48.74	17.32	50.43	16.55	94.02	19.52
9	44.54	2.13	45.74	1.90	46.09	16.87	43.70	13.90	43.59	13.91	110.26	19.52
10	59.66	1.91	61.24	1.69	57.81	16.13	57.14	13.66	58.12	13.91	116.24	19.72
11	65.55	2.13	73.64	2.54	69.53	18.11	67.23	15.85	68.38	14.87	106.84	22.74
12	57.14	5.96	63.57	6.13	65.63	25.31	68.91	21.71	63.25	19.90	87.18	23.74

Concernant l'écart de température entre les deux surfaces on distingue sur la figure 4. 7 deux ensembles d'écart : un premier ensemble où l'écart de température ne dépasse pas 6 °C se localisant en points de surface SP01 et SP02. L'autre ensemble et qui rassemble tout le reste des points de surface représentant un écart de température de plus 12 °C jusqu'à 25°C entre la semelle et le tissu de coton. On peut dire alors que le transfert de chaleur de semelle au tissu n'est pas uniforme sur toute la surface. De plus le transfert de chaleur est moins uniforme au début et à la fin du cycle de chauffe pour tous les points de surface. C'est qu'à partir de deuxième pic de température qu'on obtient un écart de température plus ou moins stable.



**Figure 4. 7** Écart de température entre les deux surfaces pour chaque pic de température.



**Figure 4. 8** Le déphasage temporel entre la semelle et le tissu de coton entre deux pics de chaleurs respectifs de chaque profil de température.

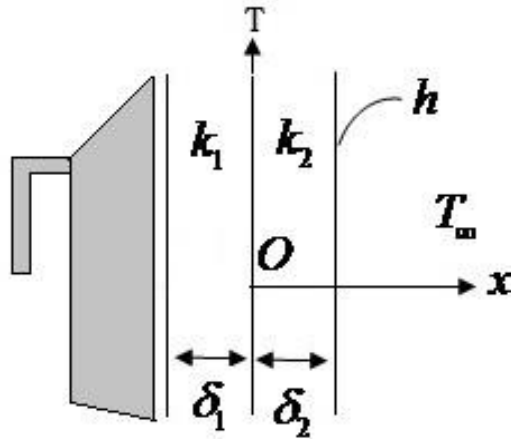
On peut voir sur la figure 4. 8 que le déphasage temporel pour tous les points de surface a une allure ascendante avec une petite chute à partir du 11<sup>ème</sup> pic de température dû à la baisse de température de la semelle résultante de fin de cycle de chauffe. Ce que signifie que le transfert de chaleur est plus rapide et plus optimal au début de cycle de chauffe seulement.

D'autre part, le déphasage temporel en point de surface SP06 et qui est le point aberrant de l'ensemble des points, est le plus mauvais déphasage (plus élevé). Dans cette zone il faut au moins 50 secondes pour que la deuxième surface de textile atteigne un pic de température émis par la semelle. La température de surface dans ce point n'est pas assez haute en comparant avec les autres points de surface et dépasse à peine 130°C, c'est qui peut expliquer ce transfert de chaleur ralenti.

## 2.2 Approche mathématique du transfert de chaleur dans le cas de repassage

La non uniformité de distribution de chaleur sur toute la surface de la semelle du fer à repasser rend la détermination de température de surface du textile à un point quelconque difficile. Avec la caméra thermique on ne peut mesurer que la température de surface et sur le côté envers de tissu c'est-à-dire la face non exposée directement à la source de chaleur. Afin de pouvoir accéder à la température de n'importe quel point du tissu nous nous sommes proposés de développer un modèle théorique capable de simuler le profil de température sur toute l'épaisseur du textile. Dans nos calculs nous postulons que la surface du textile en contact direct avec la semelle est en permanence à la même température que celle-ci.

Le repassage d'un tissu est une opération qui consiste à mettre en contact une surface chaude, ici la semelle du fer à repasser, et une des surfaces du tissu. Le tissu est disposé sur une table à repasser qui est recouverte d'une épaisseur d'un matelas. La semelle plane du fer à repasser est alors mise en contact avec la surface supérieure du tissu Le schéma représentatif de ce dispositif est présenté sur la figure 4. 9 :



**Figure 4. 9** Schéma du transfert de chaleur à travers les épaisseurs du tissu et du matelas.

Où  $k_1$  et  $k_2$  sont les conductivités thermiques du tissu et du matelas, respectivement.  $\delta_1$  et  $\delta_2$  sont les épaisseurs respectives du tissu et du matelas.  $h$  est le coefficient d'échange de chaleur par convection entre le matelas et l'air ambiant. L'axe des  $Ox$  est dirigé dans le sens du transfert de chaleur et l'origine de l'axe est choisie, par commodité, à l'interface entre le tissu et le matelas.

On souhaite modéliser et simuler ce transfert de chaleur. Cependant, la température de la surface de la semelle n'étant pas uniforme (voir 2.1), la modélisation mathématique de ce phénomène serait très complexe. On se contentera de faire l'hypothèse que la température de la semelle est constante et uniforme sur toute sa surface. On supposera que la température à travers le tissu et le matelas varie en fonction de la position ainsi que temps.

Un bilan de chaleur sur le tissu et le matelas conduit aux équations différentielles suivantes [76] :

- Equation régissant les variations de la température,  $T_c(x, t)$ , dans le tissu

$$\frac{\partial T_c(x, t)}{\partial t} = a_c \frac{\partial^2 T_c(x, t)}{\partial x^2} \quad (\text{IV.3})$$

avec  $a_c = \frac{k_1}{\rho_1 c_{p1}}$  étant la diffusivité thermique de tissu.

- Equation régissant les variations de la température,  $T_m(x, t)$  dans le matelas

$$\frac{\partial T_m(x, t)}{\partial t} = a_m \frac{\partial^2 T_m(x, t)}{\partial x^2} \quad (\text{IV.4})$$

avec  $a_m = \frac{k_2}{\rho_2 c_{p2}}$  étant la diffusivité thermique du matelas.

À ces équations différentielles, on doit ajouter ou associer des conditions initiales et aux limites. Celles-ci s'expriment comme suit :

À l'instant  $t = 0$ , on supposera que les températures du Tissu et du Matelas sont constantes, à travers toutes leurs épaisseurs, et égales à la température ambiante de l'air et qui est notée ici  $T_\infty$ . On aura alors,

$$T_c(x, 0) = T_\infty \quad \text{et} \quad T_m(x, 0) = T_\infty \quad (\text{IV.5})$$

Les conditions aux limites expriment la prescription de la température de la semelle,  $T_{fer}$ , sur la face  $x = -\delta_1$  du tissu, la continuité des températures et des flux de chaleur à l'interface Tissu-Matelas et enfin la condition d'évacuation de la chaleur par convection par la face  $x = \delta_2$  du matelas. On aura alors :

$$T_c(0, t) = T_{fer} \quad (\text{IV.6})$$

Température prescrite à  $x = -\delta_1$

$$T_c(0, t) = T_m(0, t) \quad (\text{IV.7})$$

Continuité des températures à  $x = 0$  (interface Tissu-Matelas)

$$-k_1 \left. \frac{\partial T_c(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = -k_2 \left. \frac{\partial T_m(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (\text{IV.8})$$

Continuité des flux de chaleur à  $x = 0$  (interface Tissu-Matelas)

$$-k_2 \left. \frac{\partial T_m(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\delta_2} = h [T_m(\delta_2, t) - T_\infty] \quad (\text{IV.7})$$

Evacuation de la chaleur par convection par la face  $x = \delta_2$  du matelas.

L'étape suivante consiste à réécrire ces équations sous forme adimensionnelle. On définit pour ce faire les variables adimensionnelles suivantes :

$$s = \frac{x}{\delta_2} \quad ; \quad \text{et} \quad s_0 = \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad t' = \frac{t}{t_a} \quad \text{avec} \quad t_a = \frac{(\delta_2)^2}{a_c} \quad (\text{IV.8})$$

$$\theta_c = T_c(x, t) - T_{fer} \quad \text{et} \quad \theta_m = T_m(x, t) - T_\infty \quad (\text{IV.9})$$

Les équations différentielles précédentes ainsi que les conditions initiales et aux limites deviennent :

$$\frac{\partial \theta_c(s, t')}{\partial t'} = \frac{\partial^2 \theta_c(s, t')}{\partial s^2} \quad \text{et} \quad \frac{\partial \theta_m(s, t')}{\partial t'} = \beta \frac{\partial^2 \theta_m(s, t')}{\partial s^2} \quad (\text{IV.10})$$

avec  $\beta = \frac{a_m}{a_c}$

Conditions initiales :

$$\theta_c(s, 0) = T_\infty - T_{fer} = \theta_{ci} \quad \text{et} \quad \theta_m(s, 0) = T_\infty - T_\infty = \theta_{mi} = 0 \quad (\text{IV.11})$$

Conditions aux limites :

$$\begin{aligned} \theta_c(-s_0, t') = 0 \quad & \text{Température prescrite à } s = -s_0 \\ \theta_c(0, t') - \theta_m(0, t') = T_\infty - T_{fer} \end{aligned} \quad (\text{IV.12})$$

Continuité des températures à  $s = 0$  (interface Tissu-Matelas)

$$\gamma \left. \frac{\partial \theta_c(s, t')}{\partial s} \right|_{s=0} = \left. \frac{\partial \theta_m(s, t')}{\partial s} \right|_{s=0} \quad (\text{IV.13})$$

Continuité des flux de chaleur à  $s = 0$  (interface Tissu-Matelas) avec  $\gamma = \frac{k_1}{k_2}$

$$\left. \frac{\partial \theta_m(s, t')}{\partial s} \right|_{s=1} = -B_i \theta_m(1, t') \quad (\text{IV.14})$$

Evacuation de la chaleur par convection par la face  $s = 1$  du matelas avec  $B_i = \frac{h\delta_2}{k_2}$

(Nombre de Biot de chaleur)

La résolution de ces équations différentielles a été faite par la méthode de séparation des variables. En raison du caractère non homogène de la condition de continuité des températures, un traitement spécial a été nécessaire pour l'utilisation de cette méthode. Les détails de cette résolution sont donnés en annexe. La solution s'écrit alors comme suit :

$$\theta_c(s, t') = \frac{(T_\infty - T_{fer})}{[B_i s_0 + (1 + B_i)\gamma]} B_i (s + s_0) + \sum_{n=1}^{\infty} E_n Y_n(s) \exp(-\beta(\alpha_m^n)^2 t') \quad (\text{IV.15})$$

$$\theta_m(s, t') = \frac{(T_\infty - T_{fer})}{[B_i s_0 + (1 + B_i)\gamma]} \gamma [B_i s - (1 + B_i)] + \sum_{n=1}^{\infty} E_n Z_n(s) \exp(-\beta(\alpha_m^n)^2 t') \quad (\text{IV.16})$$

Avec :

$$Y_n(s) = \frac{\sin\{\alpha_c^n (s + s_0)\}}{\cos(\alpha_c^n s_0)} \quad (\text{IV.17})$$

$$Z_n(s) = \frac{\gamma\sqrt{\beta}}{\cos(\alpha_m^n)R_2(\alpha_m^n)} \left[ \alpha_m^n \cos\{\alpha_m^n (s - 1)\} - B_i \sin\{\alpha_m^n (s - 1)\} \right] \quad (\text{IV.18})$$

$$E_n = \frac{2(T_\infty - T_{fer}) \cos(\sqrt{\beta}\alpha_m^n s_0)}{\sqrt{\beta}\alpha_m^n \left[ s_0 + \gamma \left\{ \frac{\cos(\sqrt{\beta}\alpha_m^n s_0)}{\cos(\alpha_m^n)} \right\}^2 \times \frac{[(\alpha_m^n)^2 + (B_i)^2 + B_i]}{[R_2(\alpha_m^n)]^2} \right]} \quad n > 0 \quad (\text{IV.19})$$

Les  $\alpha_m^n$  sont solutions de l'équation transcendante

$$\text{tg}(\sqrt{\beta}\alpha_m^n s_0) = \gamma\sqrt{\beta} \frac{R_1(\alpha_m^n)}{R_2(\alpha_m^n)} \quad (\text{IV.20})$$

où  $R_1(\alpha_m) = B_i \text{tg}(\alpha_m) + \alpha_m$  et  $R_2(\alpha_m) = \alpha_m \text{tg}(\alpha_m) - B_i$ .

Il est intéressant de noter que chacune des solutions données est une somme d'une solution stationnaire (indépendante du temps) et d'une solution transitoire. Il faut aussi noter que les solutions stationnaires sont des fonctions linéaires de la position.

### 2.3 Exemples d'application de l'approche mathématique

Dans les tableaux 7 et 8 on précise les caractéristiques des matériaux employés et les différentes constantes appliquées dans le calcul de modèle.

**Tableau 7 :** Caractéristiques des interfaces tissu et matelas de repassage

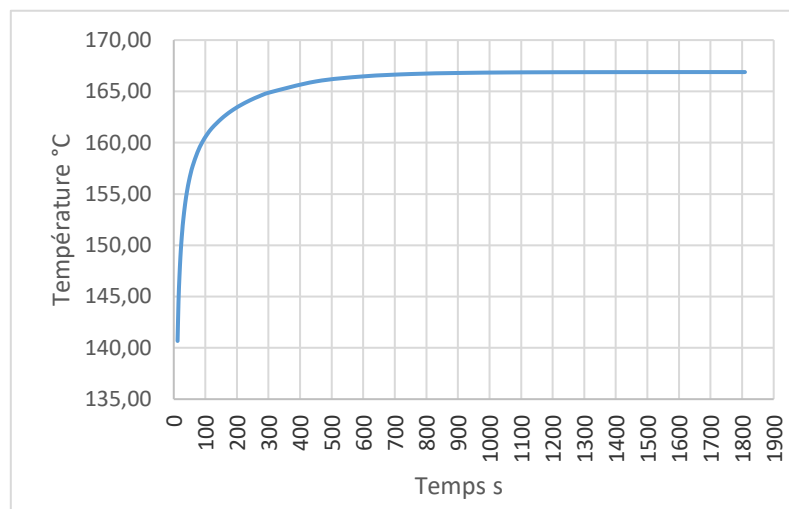
	Tissu de coton 2	Matelas en mousse de polyuréthane
Epaisseur $\delta$ (mm)	0.33	3
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1500	1250
Conductivité thermique $k$ (W/m.K)	0.06	0.027
Chaleur spécifique $C_p$ (J/kg.K)	1340	1800
Diffusivité thermique $a$ (m <sup>2</sup> /s)	2.98507E-08	1.20E-08
Coefficient de convection $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)		10

**Tableau 8:** Constantes employées dans le modèle mathématique

<b>Nombre de Biot Bi</b>	1.11
<b>Gamma <math>\gamma</math></b>	2.22
<b>Beta <math>\beta</math></b>	0.40
<b>Rapport de profondeur <math>S_0</math></b>	0.11
<b>Température de la semelle du fer <math>T_i</math> (°C)</b>	170
<b>Température ambiante <math>T_\infty</math> (°C)</b>	20

Il est à noter que le mode de transfert thermique est le paramètre pertinent dans l'opération de repassage d'où la détermination de la température d'un point donné dans le tissu est indispensable.

Selon le modèle proposé, il est enfin possible de déterminer la température en fonction de temps à n'importe quel point de l'étoffe. Sur la figure 4. 10 on illustre l'exemple du profil de température au sein de textile à la profondeur de 0.27 mm de la semelle du fer et qui n'est pas visible pour la caméra thermique. On peut observer une augmentation de température lors la mise en contact avec la semelle jusqu'au bout de 600 secondes où le profil de température se stabilise autour de 167 °C qui reste inférieur mais aussi très proche à celle de la semelle du fer.

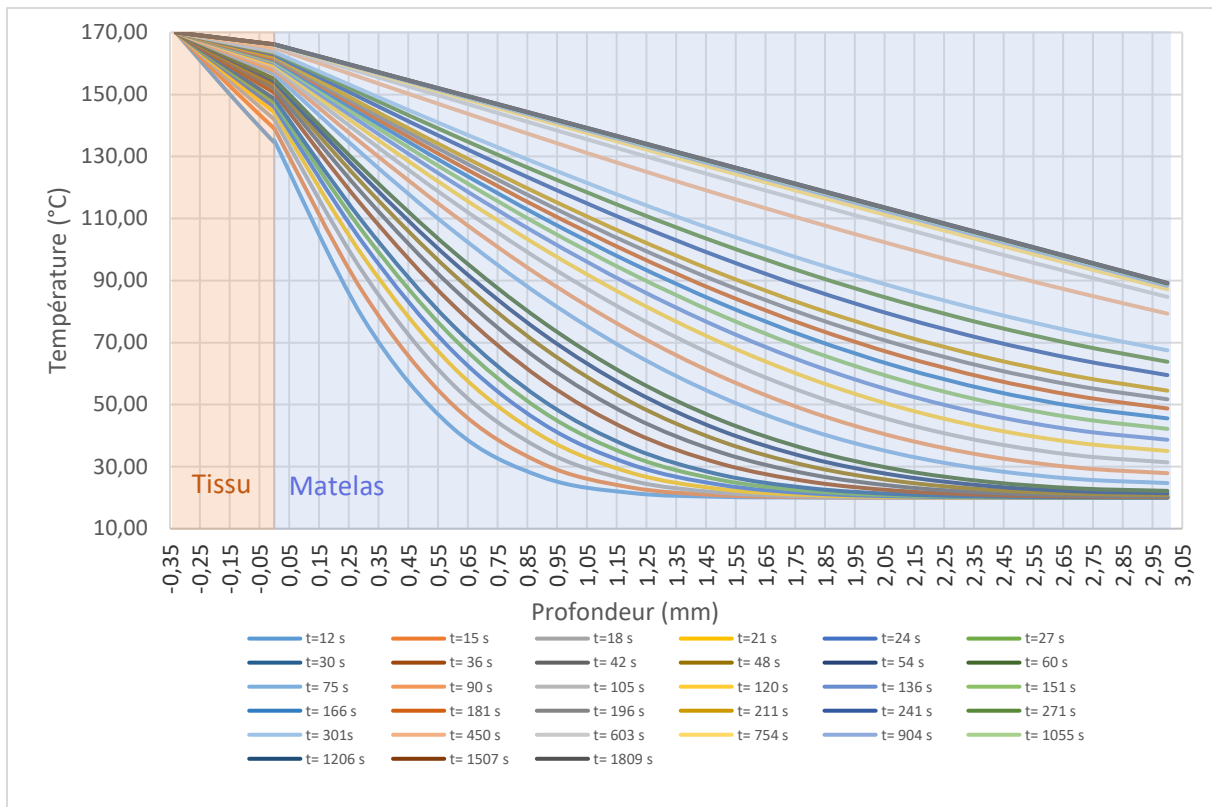


**Figure 4. 10** Évolution de la température en fonction de temps au sein de tissu de coton à 0.27 mm de profondeur de la semelle du fer.

L'ensemble des solutions stationnaires et transitoires du transfert thermique au sein de tissu de coton et de matelas de repassage sont regroupées sur la figure 4. 11. Chaque profil de température à un instant  $t$  donné représente une courbe en fonction de profondeur dans chaque matériau.

Deux zones de transfert thermiques ont été mises en évidence. On note une évolution linéairement décroissante entre la source chaude, la semelle du fer à repasser, et la face extérieure du tissu tandis que le profil de température dans le matelas suit une loi exponentiellement décroissante. Plus on avance dans le temps plus la température à la surface externe de tissu augmente et s'approche de celle de la semelle aussi que la température à la face externe du matelas.

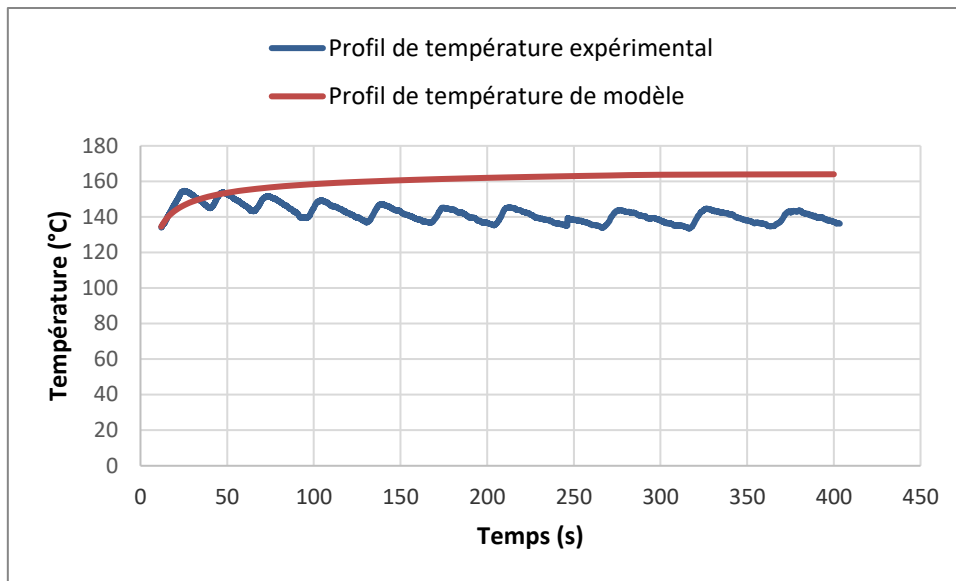




**Figure 4. 11** Profils des températures dans les interfaces tissu-matelas de repassage en fonction de temps et de profondeur.

Si on souhaite vérifier la corrélation des résultats du modèle avec ceux de l'expérimental on peut comparer la température à la face externe du tissu mesurée par la caméra thermique et celle déterminée par le modèle pour la même position (l'interface tissu-matelas). Cependant et selon les mesures de la caméra thermique, la température de 170°C établie comme température initiale pour le modèle est atteinte qu'au bout de 120 secondes pour l'expérimental. Ainsi on doit mesurer la température de l'interface tissu-matelas à l'instant  $t=120$  secondes. Cette température est de 159 °C contre 153°C pour l'expérimentale donc on peut conclure que notre modèle est précis à 6°C près pour ce cas particulier.

Par contre si on regarde le profil de température en fonction du temps de la face externe du tissu, celui du modèle s'écarte progressivement de celui de l'expérimental (voir figure 4. 12). Ceci est, probablement, dû à la fluctuation de la température de la semelle, en raison du système de contrôle PID du fer repasser. Cette fluctuation n'est pas prise en compte dans le modèle mathématique où la température de la semelle est fixée à 170 °C tout le temps. Ce qu'on peut en conclure de cette constatation est que notre modèle proposé est plus précis et fiable dans les temps courts. Ces temps courts correspondent approximativement jusqu'au deux premiers pics de température du cycle de chauffe de la semelle comme la montre la figure 4. 12.



**Figure 4. 12** Les profils de températures en fonction de temps de la face externe de tissu, non en contact avec la semelle du fer.

## Conclusion

L'étude du transfert thermique lors du repassage dans le cas de tissu de coton nous a permis d'identifier un certain nombre de difficultés dans la résolution de la problématique :

- La température de la semelle, source de chaleur pour les interfaces étudiées, n'est pas stable tout au long du repassage. Celle-ci oscille faiblement autour de la valeur fixée. Ceci est dû au système PID qui contrôle le système de chauffage de la semelle. Cet aspect-là n'a pas été considéré dans le modèle mathématique. Cet aspect-là sera étudié dans un futur travail.
- La température de la semelle à n'importe quel instant du repassage n'est pas uniforme sur toute la surface de la semelle. Ceci est dû certainement à l'élément chauffant qui ne fournit pas le même flux de chaleur à tous les points de la semelle. Cet aspect-là n'a pas non plus été pris en compte dans le modèle mathématique. Ce problème est plus complexe à résoudre, car il nécessiterait une cartographie de la répartition de la température sur toute la surface de la semelle.

## Conclusion générale et perspectives

La thématique du repassage a été souvent traité dans la littérature de manière empirique et purement qualitative et repose sur la méthode de de l'AATCC (l'AATCC 128 wrinkle recovery tester). C'est la raison pour laquelle il nous a paru nécessaire de faire le point sur l'état des connaissances scientifiques dans le domaine du repassage afin d'aborder le problème sous l'angle qui permet d'établir les corrélations pouvant exister entre les caractéristiques spécifiques du textile et l'entretien de celui-ci. Dans cette perspective, nous avons mené une étude bibliographique portant sur les caractéristiques spécifiques des fibres cellulosiques et leurs interactions avec la chaleur et l'humidité dans les conditions de repassage. L'étude a été menée sur quatre types d'échantillons, deux en coton, un en lin et un en mélange polyester-coton. A l'exception des tissus traités par apprêts infroissables, le lin et le coton ont une grande tendance à se froisser lors de l'utilisation et du stockage. Ce froissement est considéré comme étant un aspect de surface indésirable. Le moyen le plus efficace pour éliminer les plis et les froissements de la surface du textile est le dé-froissement hydro-thermique, c'est-à-dire le repassage du vêtement. Cependant, le repassage n'est pas complètement stable dans le temps, l'étoffe repassée a tendance de revenir à un état partiellement froissé par suite de la relaxation des contraintes thermomécaniques induites pendant l'opération du repassage.

Le travail de recherche mené dans le cadre de cette thèse a permis d'étudier et de comprendre les mécanismes de froissement et de dé-froissement des étoffes lors des étapes de lavage, séchage et repassage avec une focalisation particulière sur les deux dernières étapes. Nous avons ainsi déterminé les paramètres les plus influents qui gouvernent le cycle de l'entretien. Les paramètres influents, peuvent être classés en deux catégories : les paramètres intrinsèques, liés directement à la structure des étoffes et les paramètres extrinsèques liés aux conditions d'utilisations et de stockage des étoffes.

- L'étude de la caractérisation morphologique a montré que la phase amorphe des fibres cellulosiques joue un rôle important dans la stabilité thermique, dans les échanges hygroscopiques entre le milieu et les fibres et dans les propriétés mécaniques.

- L'étude de la sorption désorption d'eau, traduisant le transfert d'humidité du milieu vers la fibre et inversement a montré une cinétique d'ordre un.

- L'évaluation objective des surfaces textiles a fourni des résultats qui montrent le rôle de la plastification des fibres cellulosiques par humidité sur l'amélioration de repassage ainsi le phénomène de relaxation après repassage.

- L'étude de la relaxation des tissus de lin et de coton repassés a confirmé le retour à un état partiellement froissé. Cette relaxation a été modélisée par un système mécanique analogique de type Maxwell à deux temps.

- Les échanges thermiques entre la semelle du fer à repasser et le textile ont été évalués expérimentalement. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux calculés grâce au modèle mathématique que nous avons développé dans le cadre de cette étude.

Il serait intéressant de poursuivre cette étude en introduisant la variation oscillante de température de semelle en fonction du temps. Par ailleurs, la prise en compte de la porosité de milieu serait intéressante à prendre en considération. Ces deux points particuliers à développer pourraient contribuer à l'amélioration du modèle.

## Références

1. J.Gordon Cook, Handbook of textile fibres, vol. I. Natural fibers, page xvi, xvii et xxvii, 1984.
2. <https://textileaddict.me/les-fibres-textiles-et-leur-classification/> (22/05/2018)
3. <http://www.guidedecoton.org/guide-du-coton/formation-du-fil/> (05/01/2018)
4. <http://www.guiadealgodon.org/guide-du-coton/formation-du-tissu/> (05/01/2018)
5. Mohanty AK, Misra M & Drzal LT, Compos Interfaces 8:31319, 2001.
6. Rowell RM, Young RA & Rowell JK, Paper and composites from agro-based resources, CRC Lewis Publishers, 1997.
7. [https://textile-network.com/en/Technical-Textiles/Fasern-Garne/Forecast-world-fibre-production/\(gallery\)/3](https://textile-network.com/en/Technical-Textiles/Fasern-Garne/Forecast-world-fibre-production/(gallery)/3)
8. Union des industries textiles: textile.fr (20/03/2018)
9. Gordon, S., et Y. -L. Hsieh, Cotton, iv. Woodhead Publishing Series in Textiles, edition 2007.
10. A. M. K. Bahrum & Prang Rocky, Comparison of effectiveness between conventional scouring & bio-scouring on cotton fabrics, International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 3, Issue 8, August-2012.
11. Merrill G, Macormac A & Mauersberger H, American Cotton Handbook, Deuxième Edition Révisée, Textile Book Publishers, New York 16, NY, 1949.
12. Proto, Maria, Stefania Supino, et Ornella Malandrino, Cotton: A flow cycle to exploit. Industrial Crops and Products 11 (mars): 173-78, 2000.
13. C. Bergfjord et al., 30 000-Year-Old Wild Flax Fibers, Science, vol, 328, n° 5986, p. 1634-1634, 25 juin 2010.
14. <https://www.mastersoflinen.com/eng/lin/1-la-filiere-de-proximite> (22/03/2018)
15. Fibers, X-Q. Dai, in Biomechanical Engineering of Textiles and Clothing, 2006.
16. Ali Amiri, Chad A. Ulven & Shanshan Huo, Effect of chemical treatment of flax fiber and resin manipulation on service life of their composites using time-temperature superposition, October 2015.
17. Bledzki, A & Gassan, J, Composites reinforced with cellulose based fibres, Prog, Polym, Sci, 24, 221-274, 1999.
18. J. A. Howsmon & W. A. Sisson, High Polymers; Structure and properties of cellulose fibers. B-Submicroscopic structure, in Cellulose and Cellulose Derivatives, Part I; V, 231-346, 1963.
19. M. Marx Figini, Biosynthesis of cellulose in higher and lower plants, Journal of Polymer Science Part C Polymer Symposia 28, March 2007.

20. Jim D. Wilson & J. Kelvin Hamilton, Wood cellulose as a chemical feedstock for the cellulose esters industry, *Journal of Chemical Education* 63 (1), 49, 1986.
21. Perez, S., Structure et morphologie de la cellulose. In *Initiation à la science des polymères*, 1-43. GFP, 2006
22. Atalla & Vander Hart, *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*\_Volume 15, Issue 1, Pages 1-19, October 1999.
23. Gardner, K. H. & J. Blackwell, The Structure of Native Cellulose. *Biopolymers* 13 (10): 1974.
24. Sarko A. & R. Muggli, « Packing Analysis of Carbohydrates and Polysaccharides. III. Valonia Cellulose and Cellulose II ». *Macromolecules* 7 (4): 486-94, 1974.
25. William Smith Denham & Hilda Woodhouse, The methylation of cellulose , Volume 103, *Journal of the Chemical Society*, 1913.
26. James Colquhoun Irvine & Edmund Langley Hirst, The constitution of polysaccharides. Part V, The yield of glucose from cotton cellulose, *Journal of the Chemical Society*, Volume 121, 1922.
27. Yin & Brown, The reactivity of cellulose: III. The interaction of cotton linters alternately wetted with water at various temperatures and dried, *Canadian journal of chemistry*, February 1959.
28. Boчек & Kalyuzhnaya, Interaction of water with cellulose and cellulose acetates as influenced by the hydrogen bond system and hydrophilic-hydrophobic balance of the macromolecules, *Russian journal of applied chemistry*, 75(6):989-993, June 2002.
29. Lenz, W. « Distribution of Methoxyl Groups in the Methylation of the Monosodio Derivatives of Methyl -D-Glucopyranoside and Cellulose 1·2 » 82: 5, 1960.
30. Krässig, Cellulose, Structure, Accessibility and Reactivity, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* 32 (12): 2401-2401, 1993.
31. Mansoor I, Munazza S, Aleem A, Kamran A, Arsheen M, et Khalil A. « Textile Environmental Conditioning: Effect of Relative Humidity Variation on the Tensile Properties of Different Fabrics ». *Journal of Analytical Sciences, Methods and Instrumentation* 02 (02): 92-97, 2012.
32. Desvaux, Mickaël, « *Clostridium cellulolyticum*: model organism of mesophilic cellulolytic clostridia ». *FEMS Microbiology Reviews* 29 (4): 741-64, 2005.
33. Lin, J.S., Tang, M.-Y., and Fellers, J.F., Fractal analysis of cotton cellulose as characterized by small-angle X-ray scattering. In *ACS Symposium Series*, (Oxford University Press), pp. 233–254, 1987.
34. Lyuba I. Mikhalovska, Vladimir M. Gun'ko, a, b Anna A. Rugal, b Olena I. Oranska, b Yuriy I. Gornikov, b Claudine Morvan, c Nadège Follain, c Catherine Domasa, d & Sergey V. Mikhalovsky, Cottonised flax fibres vs cotton fibres: structural, textural and adsorption characteristics, *RSC Advances* 2(5):2032-2042, March 2012.
35. S. Park, J.O. Baker, M.E. Himmel, P.A. Parilla and D.K. Johnson, *Biotechnol. Biofuel.*, 3, 1, 2010.
36. Brandrup, J., and Immergut, E.H. *Polymer handbook* (New York: Wiley), 1989.
37. Ludwik Szcześniak Adam Rachocki Jadwiga Tritt-Goc, Glass transition temperature and thermal decomposition of cellulose powder, *Cellulose*, 2008.

38. D. Klemm & B. Philipp, *Comprehensive cellulose chemistry. Volume 1: Fundamentals and analytical methods*, cabdirect.org, 1998.
39. Mark, Richard E. *Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard*. New York: Dekker, 1983.
40. Mark, H.F., Bikales, N.M., Overberger, C.G., Menges, G., and Kroschwitz, J.I., *Cellular Materials to Composites* (New York: Wiley-Interscience), 1985.
41. J. Brandrup and E. H. Immergut, *Polymer handbook: Third edition* Edited by, Wiley-Interscience, Chichester, 1989.
42. Degiovanni, Alain, et Yves Jannot, *Thermal Properties Measurement of Materials*, John Wiley & Sons, 2018.
43. Dwiargo B., "Détermination expérimentale de l'influence de l'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux du génie civil", Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, Toulouse, 1994.
44. Jannot Y., "Isothermes de sorption : modèles et détermination", Laboratoire Energétique et Phénomène de Transfert (LEPT), Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers ENSAM de Bordeaux –Talence, Université de Bordeaux, Bordeaux, 2003.
45. Bhourri. N, *Comportement thermodynamique et dimensionnel des matériaux textiles soumis à des variations des conditions climatiques*. Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2009.
46. Benamar S., "Etude expérimentale et modélisation des transferts de masse et de chaleur à travers un tissu vestimentaire en régime dynamique : phénomène de sorption, de mouillage et de capillarité", Thèse de Doctorat de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, Nice, 1998.
47. Brunauer S, Emmet PH et Teller E. *J. Am. Chem. Soc* 60, 309, 1938.
48. J. W. S. Hearle & W E Morton, *Physical Properties of Textile Fibres*, 4th Edition, 2008.
49. Okubayashi, Satoko, Ulrich J. Griesser, et Thomas Bechtold, « A Kinetic Study of Moisture Sorption and Desorption on Lyocell Fibers ». *Carbohydrate Polymers* 58 (3): 293-99, 2004.
50. Velde, Kathleen, et Elke Baetens, « Thermal and Mechanical Properties of Flax Fibres as Potential Composite Reinforcement ». *Macromolecular Materials and Engineering* 286 (juin): 342-49, 2001.
51. Bourmaud, Alain, Claudine Morvan, et Christophe Baley, « Importance of Fiber Preparation to Optimize the Surface and Mechanical Properties of Unitary Flax Fiber ». *Industrial Crops and Products* 32 (3): 662-67, 2010.
52. Morvan C, Andème-Onzighi C, Girault R et al., *Building flax fibres: more than one brick in the walls*. *Plant PhysiolBiochem* 41:935–944, 2003.
53. Navi et Frédéric Heger, *Comportement thermo-hydromécanique du bois*, 2005.
54. K. Mazeau and L. Heux, *Molecular Dynamics Simulations of Bulk Native Crystalline and Amorphous Structures of Cellulose*, *The Journal of Physical Chemistry B*, 2003.
55. Karing VA, Kozlov PV, Wan Naj-Tchan, *Investigation of the glass phase transition temperature in cellulose*. *Doklady Akad Nauk SSSR* 130:356–358, 1960.

56. Szcześniak, Ludwik, Adam Rachocki, et Jadwiga Tritt-Goc. « Glass Transition Temperature and Thermal Decomposition of Cellulose Powder ». *Cellulose* 15 (3): 445-51, 2008.
57. Salmén, N. L., et G. L. Back. « The Influence of Water on the Glass Transition Temperature of Cellulose », 1977.
58. Batzer, Hans, et Ursula T. Kreibich. 1981. « Influence of Water on Thermal Transitions in Natural Polymers and Synthetic Polyamides ». *Polymer Bulletin* 5 (11): 585-90.
59. Paes, Sabrina, Shao min Sun, William MacNaughtan, Roger Ibbett, Johannes Ganster, Tim Foster, et John Mitchell. 2010. « The glass transition and crystallization of ball milled cellulose ». *Cellulose* 17 (août): 693-709.
60. Couchman, P. R., et F. E. Karasz. « A Classical Thermodynamic Discussion of the Effect of Composition on Glass-Transition Temperatures ». *Macromolecules* 11 (1): 117-19, 1978.
61. Agriculture research service, Equilibrium moisture content of fiber flax, United States department of agriculture in cooperation with the Oregon agricultural experiment station, Technical bulletin n°1200, 1959.
62. W. S. Anthony, William D., Cotton Ginners Handbook, Mayfield DIANE Publishing. (01-Nov-1995).
63. Steven B. Warner., Fiber Science, Prentice Hall Publishers,1955.
64. S. Gordon and Y.-L. Hsieh, Cotton Science and Technology, 2007
65. R. Meredith, "Moisture in Textile," 1st Edition, Textile Book Publication, New York, 1960.
66. Meredith, R., The Elastic Properties of Textile Fibers, J. Textile Inst. 37, P469–P480,1946.
67. Scholefield F., "fibre science", The Textile Institute, Département de chimie textile Collège de Technologie de Manchester, Manchester, 1949.
68. MORTON, William Ernest.; HEARLE, John.W.S.. Physical Properties of Textile Fibers. 3 ème édition. The Textile Institute. 725 p, 1997.
69. William J. Lennarz and M. Daniel Lane «Encyclopedia of Biological Chemistry II | ScienceDirect ». Second Edition, 2013.
70. AATCC, American Association of Textile Chemists and Colorists, Test methods 128-1999, wrinkle recovery of fabrics: Appearance method, AATCC Technical Method of Standard Testing Methods, Vol.75, 213-214, 2000.
71. source JISL1905 (15/06/2017).
72. Xu B, Reed JA. Instrumental evaluation of fabric wrinkle recovery. Journal of the Textile Institute; 86: 129–135, 1995.
73. Na Y, Pourdeyhimi B. Assessing wrin - kling using image analysis and replicate standards. Textile Research Journal; 65: 149–157, 1995.
74. Jinlian Hu And Binjie Xin, Measuring and Modeling 3D Wrinkles in Fabrics Institute of Textiles and Clothing, Textile research journals, Vol 72, Issue 10, 2002.

75. Yiliang Wang , Na Deng , Binjie Xin, Investigation of 3D surface profile reconstruction technology for automatic evaluation of fabric smoothness appearance , *Measurement*, Volume 166, 2020.
76. Theodore L. Bergman & Adrienne S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, eighth edition, 2017.
77. Bisanda ETN, Ansell MP. *J Mater Sci* 1992;27:1690–1700.
78. Sridhar MK, Basavarajappa G. *Indian J Text Res* 1982;7(9):87–92.
79. Zeronian SH. *J Appl Polym Sci* 1991;47:445–461
80. MW Ballard - *Textile Conservation Newsletter*, 1995 - repository.si.edu
81. Iqbal, Mansoor, Munazza Sohail, Aleem Ahmed, Kamran Ahmed, Arsheen Moiz, et Khalil Ahmed, « Textile Environmental Conditioning: Effect of Relative Humidity Variation on the Tensile Properties of Different Fabrics ». *Journal of Analytical Sciences, Methods and Instrumentation* 02 (02): 92-97, 2012.
82. Marion F. Mecklembourg. « the structure of canavas supported paintings». p147, 2005.
83. Rabinowicz E, *Friction and wear of materials*, John Wiley: New York and London,1965.
84. Meredith R (1954), ‘Relaxation of stress in stretched cellulose fibres’, *J Textile Inst*, 45, T438–461.
85. J. MANDEL : *cours de mécanique des milieux continus. Tome II*, Gauthiers-villars, Paris, France, 1966.
86. Georges, J,M,, 2002, *Frottement, usure et lubrification – Éditions Eyrolles, CNRS Editions*,
87. Amontons, G, 1699, *De la résistance causée dans les machines, Mémoire de l’Académie Royale des Sciences*, Paris.
88. Radmacher M, Fritz M and Hansma P K, ‘Imaging soft samples with the Atomic Force Microscope: Gelatin in Water and Propanol’, *Biophys. J.*, 1995, **69**(1), 264.
89. Ruths M, Alcantar N A and Israelachvili J N, ‘Boundary friction of aromatic silane self-assembled monolayers measured with the Surface and Friction Force Microscopy’ *J. Phys. Chem. B*, 2003, 107(40), 11149.
90. AFNOR, « Textiles - Essais des fils - Détermination de la masse linéique », NF G07-316, Paris : AFNOR, p. 22, 1988.
91. AFNOR, « Textiles - Étoffes - Détermination de la masse surfacique sur de petits échantillons », NF EN 12127, La Plaine Saint-Denis: AFNOR, p. 14, mars 1998.
92. ISO, *Textiles - Determination of thickness of textiles and textile products*, ISO 5084, Technical Committee ISO/TC 38/SC 24, 1996.
93. wikipedia.org, *Analyse thermo gravimétrique appareil.svg*, Christophe Dang Ngoc Chan, 2006.
94. J. Fan, W. Yu and L. Hunter, *Clothing appearance and fit*, The Textile Institute, 2004.
95. R.Zaouali, S. Msalhi, B. El Abed and F. Sakli, *Objective evaluation of multidirectional fabric wrinkling using image analysis*, 2006.



96. Riande, Evaristo, Ricardo Diaz-Calleja, Margarita Prolongo, Rosa Masegosa, et Catalina Salom. *Polymer Viscoelasticity: Stress and Strain in Practice*. CRC Press, 1999.
97. ISO, *Textiles- Tensile properties of fabrics. Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using*, 2013.
98. Dhouib, S. "Etude du comportement tinctorial des fibres de polyester aux colorants dispersés.", Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace, 2003.
99. Bernhard Wunderlich, *Thermal Analysis of Polymeric Materials*, Springer (2005-05-31).
100. Saad El-Sayed, Mohamed E. Mostafa, *Pyrolysis characteristics and kinetic parameters determination of biomass fuel powders by differential thermal gravimetric analysis (TGA/DTG)*, 2014.
101. Hebel, H.H., et H.J. Kolb. « The Measurement of Fabric Wrinkling ». *Textile Research Journal* 20 (9): 650-53, 1950.
102. Kang T.J, Kim S.C, Sul I.H, Youn J.R and Chung K. «Fabric Surface Roughness Evaluation Using Wavelet-Fractal Method Part I: Wrinkle, Smoothness and Seam Pucker », *Textile research Journal*, Vol.75, No 11, 751-760, 2005.
103. M. Mohri, S. A. Hosseini Ravandi & M. Youssefi « Objective evaluation of wrinkled fabric using radon transform » : *The Journal of The Textile Institute*: Vol 96, No 6, 365-370, 2005.
104. Sun J., Yao M. , Xu B., and Bel P. « Fabric Wrinkle Characterization and Classification Using Modified Wavelet Coefficients and Support-Vector-Machine Classifiers ». *Textile Research Journal* Vol. 81, No 6, 902-13, 2011.
105. <https://imattec.com/en/ptfe.php>
106. Saville, B. P. « 6 - Dimensional Stability ». In *Physical Testing of Textiles*, 168-83. Woodhead Publishing Series in Textiles, 1999.
107. Gagliardi, D.D. & Grunfest, I.J., *Creasing and Crease proofing of Textiles*. *Textile Research Journal*, 20(3), 180–188, 1950.

## **Annexes**

# Annexe 1

Tableau A.1

	Tissu froissé avant repassage		Tissu repassé avec V1	
	Image Acquise	Image traitée	Image Acquise	Image traitée
Tissu 2				
Tissu 4				

Tableau A.2

	Tissu froissé avant repassage		Tissu repassé avec V2	
	Image Acquise	Image traitée	Image Acquise	Image traitée
Tissu 2				
Tissu 4				

## Annexe 2

### 1- Equations régissant le transfert de chaleur

Les équations régissant le transfert de chaleur dans les deux matériaux sont comme suit :

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = a_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} \quad \text{avec} \quad a_c = \frac{k_1}{\rho_1 c_1} \quad (\text{A.1a})$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = a_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \quad \text{avec} \quad a_m = \frac{k_2}{\rho_2 c_2} \quad (\text{A.1b})$$

Les conditions initiales et aux limites correspondantes sont :

- Conditions initiales

$$T_c(x, 0) = T_\infty \quad T_m(x, 0) = T_\infty \quad (\text{A.2})$$

- Conditions aux limites

$$T_c(-\delta_1, t) = T_{fer} : \text{Température prescrite sur la semelle du fer à repasser} \quad (\text{A.3})$$

$$T_c(0, t) = T_m(0, t) : \text{Continuité de la température à l'interface tissu-matelas} \quad (\text{A.4a})$$

$$-k_1 \left. \frac{\partial T_c}{\partial x} \right|_{x=0} = -k_2 \left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{x=0} : \text{Continuité du flux de chaleur à l'interface tissu-matelas} \quad (\text{A.4b})$$

$$-k_2 \left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{x=\delta_2} = h [T_m(\delta_2, t) - T_\infty] \text{ Condition d'évacuation de la chaleur par convection} \quad (\text{A.5})$$

### 2- Équations adimensionnelles

Pour rendre les équations adimensionnelles on pose :

$$\theta_c(x, t) = T_c(x, t) - T_{fer} \quad \theta_m(x, t) = T_m(x, t) - T_\infty \quad (\text{A.6})$$

et

$$s = \frac{x}{\delta_2} \quad ; \quad s_0 = \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad \text{et} \quad t' = \frac{t}{t_a} \quad \text{où} \quad t_a = \frac{(\delta_2)^2}{a_c} \quad (\text{A.7})$$

On aura alors :

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial t'} = \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial s^2} \quad (\text{A.8a})$$

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial t'} = \beta \frac{\partial^2 \theta_m}{\partial s^2} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{a_m}{a_c} \quad (\text{A.8b})$$

Les conditions initiales et aux limites deviennent :

$$\theta_c(s, 0) = T_\infty - T_{fer} = \theta_{ci} \quad \theta_m(s, 0) = T_\infty - T_\infty = 0 = \theta_{mi} \quad (\text{A.9})$$

$$\theta_c(-s_0, t) = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$\theta_c(0, t') - \theta_m(0, t') = T_\infty - T_{fer} \quad (\text{A.11a})$$

$$\gamma \left. \frac{\partial \theta_c(s, t')}{\partial s} \right|_{s=0} = \left. \frac{\partial \theta_m(s, t')}{\partial s} \right|_{s=0} \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{k_1}{k_2} \quad (\text{A.11b})$$

$$\left. \frac{\partial \theta_m(s, t')}{\partial s} \right|_{s=1} = -B_i \theta_m(1, t') \quad B_i = \frac{h \delta_2}{k_2} \text{ (Nombre de Biot)} \quad (\text{A.12})$$

### 3- Résolution des équations

On se propose de résoudre ces équations en utilisant la méthode de séparation des variables. Toutefois, cette méthode nécessite que les équations ainsi que les conditions aux limites soient homogènes. Un examen de ces équations, nous permet de constater que la condition aux limites, (A.11a), relative à la continuité de la température à l'interface tissu-matelas n'est pas homogène. Le terme  $T_\infty - T_{fer}$  en est la cause. Pour pallier à cette difficulté, on procède comme suit ; On écrit que la solution recherchée est une combinaison d'une solution stationnaire et d'une solution transitoire. On aura donc :

$$\theta_c(s, t') = \theta_c^0(s) + \theta_c^1(s, t') \quad (\text{A.13a})$$

$$\theta_m(s, t') = \theta_m^0(s) + \theta_m^1(s, t') \quad (\text{A.13b})$$

La substitution de (A.13a) et (A.13b) dans les équations (A.8a) et (A.8b) respectivement, nous permet de déduire les équations suivantes, pour la partie stationnaire:

$$\frac{d^2 \theta_c^0(s)}{ds^2} = 0 \quad (\text{A.14a})$$

et

$$\frac{d^2 \theta_m^0(s)}{ds^2} = 0 \quad (\text{A.14b})$$

avec les conditions suivantes :

$$\theta_c^0(-s_0) = 0 \quad (\text{A.15a})$$

$$\theta_c^0(0) = \theta_m^0(0) + T_\infty - T_{fer} \quad (\text{A.15b})$$

$$\gamma \left. \frac{d\theta_c^0(s)}{ds} \right|_{s=0} = \left. \frac{d\theta_m^0(s)}{ds} \right|_{s=0} \quad (\text{A.15c})$$

et

$$\left. \frac{d\theta_m^0(s)}{ds} \right|_{s=1} = -B_i \theta_m^0(1) \quad (\text{A.15d})$$

Pour la phase transitoire, on a :

$$\frac{\partial \theta_c^1(s, t')}{\partial t'} = \frac{\partial^2 \theta_c^1(s, t')}{\partial s^2} \quad (\text{A.16a})$$

et

$$\frac{\partial \theta_m^1(s, t')}{\partial t} = \beta \frac{\partial^2 \theta_m^1(s, t')}{\partial s^2} \quad (\text{A.16ba})$$

avec les conditions suivantes :

$$\theta_c^1(-s_0, t') = 0 \quad (\text{A.17a})$$

$$\theta_c^1(0, t') = \theta_m^1(0, t') \quad (\text{A.17b})$$

$$\gamma \left. \frac{\partial \theta_c^1(s, t')}{\partial s} \right|_{s=0} = \left. \frac{\partial \theta_m^1(s, t')}{\partial s} \right|_{s=0} \quad (\text{A.17c})$$

et

$$\left. \frac{\partial \theta_m^1(s, t')}{\partial s} \right|_{s=1} = -B_i \theta_m^1(1, t') \quad (\text{A.17d})$$

### 3.1- Partie stationnaire

La résolution des équations (A.14a) et (A.14b) avec l'utilisation des conditions aux limites (A.15a), (A.15b), (A.15c) et (A.15d) conduisent aux solutions stationnaires suivantes :

$$\theta_c^0(s) = \frac{(T_\infty - T_{fer}) B_i}{[B_i s_0 + (1 + B_i) \gamma]} (s + s_0) \quad -s_0 \leq s \leq 0 \quad (\text{A.18a})$$

$$\theta_m^0(s) = \frac{\gamma (T_\infty - T_{fer})}{[B_i s_0 + (1 + B_i) \gamma]} [B_i s - (1 + B_i)] \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (\text{A.18b})$$

### 3.2- Partie transitoire

Pour la résolution des équations (A.16a) et (A.16b) du régime transitoire, on peut maintenant utiliser la méthode de séparation de variables car toutes les équations régissant le régime transitoire sont homogènes. On écrit alors :

$$\theta_c^1(s, t') = X_c(s) \tau_c(t') \quad \text{pour le tissu} \quad (\text{A.19a})$$

$$\text{Et } \theta_m^1(s, t') = X_m(s) \tau_m(t') \quad \text{pour le matelas} \quad (\text{A.19b})$$

où  $X_c(s)$  et  $X_m(s)$  sont des fonctions de la position  $s$  seulement, et  $\tau_c(t')$  et  $\tau_m(t')$  sont des fonctions du temps seulement.

La substitution de (A.19.a) dans (A.16a) donne

$$X_c(s) \frac{d\tau_c(t')}{dt'} = \frac{d^2 X_c(s)}{ds^2} \tau_c(t') \quad (\text{A.20a})$$

où encore

$$\frac{\frac{d\tau_c(t')}{dt'}}{\tau_c(t')} = \frac{\frac{d^2 X_c(s)}{ds^2}}{X_c(s)} = \text{constante} = A_c \quad (\text{A.20b})$$

De la même manière, La substitution de (A.19.b) dans (A.16b) donne

$$X_m(s) \frac{d\tau_m(t')}{dt'} = \beta \frac{d^2 X_m(s)}{ds^2} \tau_m(t') \quad (\text{A.21a})$$

c'est-à-dire

$$\frac{\frac{d\tau_m(t')}{dt'}}{\tau_m(t')} = \beta \frac{\frac{d^2 X_m(s)}{ds^2}}{X_m(s)} = \text{constante} = A_m \quad (\text{A.21b})$$

De l'équation (A.20b), on en déduit que :

$$\tau_c(t') = B_c \exp(A_c t') \quad (\text{A.22a})$$

où  $B_c$  est une constante d'intégration.

De la même manière, on peut déduire de l'équation (A.21b)

$$\tau_m(t') = B_m \exp(\beta A_m t') \quad (\text{A.22b})$$

où  $B_m$  est une constante d'intégration.

Une exploitation de la condition aux limites (A.17b), nous permet de déduire que

$$\beta A_m = A_c \quad (\text{A.23})$$

Il peut être établi que les constantes  $A_c$  et  $A_m$  sont strictement négatives. De ce fait on écrit :

$$A_c = -\alpha_c^2 \quad \text{et} \quad A_m = -\alpha_m^2.$$

Il évident que la relation  $\beta A_m = A_c$ , conduit à la relation  $\alpha_c^2 = \beta \alpha_m^2$ .

L'équation (A.20b) peut s'écrire :

$$\frac{1}{X_c(s)} \frac{d^2 X_c(s)}{ds^2} = A_c = -\alpha_c^2, \text{ où } \alpha_c \text{ est un paramètre inconnu. Ceci conduit alors}$$

$$X_c(s) = C_c \sin(\alpha_c s) + D_c \cos(\alpha_c s) \text{ où } C_c \text{ et } D_c \text{ sont des constantes à déterminer.}$$

De la même façon, l'équation (A.21b) conduit à

$$X_m(s) = C_m \sin(\alpha_m s) + D_m \cos(\alpha_m s) \text{ où } C_m \text{ et } D_m \text{ sont des constantes à déterminer.}$$

L'exploitation des équations (A.17a), (A.17b) et (A.17c) donne ce qui suit :

$$X_c(s) = C_c \frac{\sin[\alpha_c(s+s_0)]}{\cos(\alpha_c s_0)} \quad (\text{A.24a})$$

$$X_m(s) = \frac{B_c}{B_m} C_c \left\{ \gamma \frac{\alpha_c}{\alpha_m} \sin(\alpha_m s) + tg(\alpha_c s_0) \cos(\alpha_m s) \right\} \quad (\text{A.24b})$$

L'exploitation de l'équation (A.17d) conduit à ce qui suit :

$$tg(\sqrt{\beta} \alpha_m s_0) = \gamma \sqrt{\beta} \frac{R_1(\alpha_m)}{R_2(\alpha_m)} \quad (\text{A.25})$$

$$\text{Avec } R_1(\alpha_m) = B_i tg(\alpha_m) + \alpha_m \quad \text{et} \quad R_2(\alpha_m) = \alpha_m tg(\alpha_m) - B_i.$$

Cette équation transcendantale permet la détermination de  $\alpha_m$  et par conséquent  $\alpha_c$ . Cette équation possède une infinité de solutions distinctes. Notons  $\alpha_m^n$  la  $n^{\text{ème}}$  solution. A chaque  $\alpha_m^n$ , on associe les solutions :

$$\tau_c^n(t') = B_c^n \exp(-(\alpha_c^n)^2 t') \quad \text{et} \quad \tau_m^n(t') = B_m^n \exp(-(\alpha_m^n)^2 t')$$

$$X_c^n(s) = C_c^n \frac{\sin[\alpha_c^n(s+s_0)]}{\cos(\alpha_c^n s_0)} \quad \text{et} \quad X_m^n(s) = \frac{B_c^n}{B_m^n} C_c^n \left\{ \gamma \frac{\alpha_c^n}{\alpha_m^n} \sin(\alpha_m^n s) + tg(\alpha_c^n s_0) \cos(\alpha_m^n s) \right\}.$$

On aura alors

$$\theta_c^{ln}(s, t') = X_c^n(s) \tau_c^n(t') = B_c^n C_c^n \frac{\sin[\alpha_c^n(s+s_0)]}{\cos(\alpha_c^n s_0)} \exp(-(\alpha_c^n)^2 t') \quad (\text{A.26a})$$

$$\theta_m^{ln}(s, t') = X_m^n(s) \tau_m^n(t') = B_c^n C_c^n \left\{ \gamma \frac{\alpha_c^n}{\alpha_m^n} \sin(\alpha_m^n s) + tg(\alpha_c^n s_0) \cos(\alpha_m^n s) \right\} \exp(-(\alpha_m^n)^2 t') \quad (\text{A.26b})$$

La solution générale pour la partie transitoire est la combinaison linéaire de toutes ces solutions. Ce qui donne alors :

$$\theta_c^l(s, t') = \sum_{n=1}^{\infty} \theta_c^{ln}(s, t') = \sum_{n=1}^{\infty} B_c^n C_c^n \frac{\sin[\alpha_c^n(s+s_0)]}{\cos(\alpha_c^n s_0)} \exp(-(\alpha_c^n)^2 t') \quad (\text{A.27a})$$

$$\theta_m^l(s, t') = \sum_{n=1}^{\infty} \theta_m^{ln}(s, t') = \sum_{n=1}^{\infty} B_c^n C_c^n \left\{ \gamma \frac{\alpha_c^n}{\alpha_m^n} \sin(\alpha_m^n s) + tg(\alpha_c^n s_0) \cos(\alpha_m^n s) \right\} \exp(-(\alpha_m^n)^2 t') \quad (\text{A.27b})$$

Ces deux dernières expressions peuvent-être réécrites comme suit :

$$\theta_c^l(s, t') = \sum_{n=1}^{\infty} E_n Y_n(s) \exp(-(\alpha_c^n)^2 t') \quad (\text{A.28a})$$

$$\theta_m^1(s, t') = \sum_{n=1}^{\infty} E_n Z_n(s) \exp\left(-(\alpha_c^n)^2 t'\right) \quad (\text{A.28b})$$

où  $E_n = B_c^n C_c^n$  et

$$Y_n(s) = \frac{\sin\{\alpha_c^n(s + s_0)\}}{\cos(\alpha_c^n s_0)} \quad (\text{A.29a})$$

$$Z_n(s) = \frac{\gamma\sqrt{\beta}}{\cos(\alpha_m^n)R_2(\alpha_m^n)} \left[ \left[ \alpha_m^n \cos\{\alpha_m^n(s-1)\} - B_i \sin\{\alpha_m^n(s-1)\} \right] \right] \quad (\text{A.29b})$$

La solution générale s'écrira alors :

$$\theta_c(s, t') = \frac{(T_\infty - T_{fer})}{[B_i s_0 + (1 + B_i)\gamma]} B_i(s + s_0) + \sum_{n=1}^{\infty} E_n Y_n(s) \exp\left(-\beta(\alpha_m^n)^2 t'\right) \quad (\text{A.30a})$$

$$\theta_m(s, t') = \frac{(T_\infty - T_{fer})}{[B_i s_0 + (1 + B_i)\gamma]} \gamma [B_i s - (1 + B_i)] + \sum_{n=1}^{\infty} E_n Z_n(s) \exp\left(-\beta(\alpha_m^n)^2 t'\right) \quad (\text{A.30b})$$

La détermination de  $E_n$  se fera par l'exploitation des conditions initiales, à savoir

$$\theta_c(s, 0) = T_\infty - T_{fer} \quad \theta_m(s, 0) = T_\infty - T_\infty = 0$$

L'implémentation de ces conditions donne :

$$\theta_c(s, 0) = \frac{(T_\infty - T_{fer})}{[B_i s_0 + (1 + B_i)\gamma]} B_i(s + s_0) + \sum_{n=1}^{\infty} E_n Y_n(s) = T_\infty - T_{fer} \quad (\text{A.31a})$$

$$\theta_m(s, 0) = \frac{(T_\infty - T_{fer})}{[B_i s_0 + (1 + B_i)\gamma]} \gamma [B_i s - (1 + B_i)] + \sum_{n=1}^{\infty} E_n Z_n(s) = 0 \quad (\text{A.31b})$$

Une combinaison adéquate de ces deux dernières équations, et après un calcul laborieux, on obtient

$$E_n = \frac{2(T_\infty - T_{fer}) \cos(\sqrt{\beta} \alpha_m^n s_0)}{\sqrt{\beta} \alpha_m^n \left[ s_0 + \gamma \left\{ \frac{\cos(\sqrt{\beta} \alpha_m^n s_0)}{\cos(\alpha_m^n)} \right\}^2 \times \frac{[(\alpha_m^n)^2 + (B_i)^2 + B_i]}{[R_2(\alpha_m^n)]^2} \right]} \quad (\text{A.32})$$



## Résumé

Le froissement des textiles pour habillement est un état de surface visuellement indésirable. Les vêtements à base de fibres cellulosiques sont les plus sujets au phénomène de froissement que le reste des étoffes et ce malgré leurs excellentes caractéristiques au porté tels que le confort, la douceur, la respirabilité etc.

Le travail de notre thèse s'inscrit dans une perspective d'étude, d'analyse et de compréhension des phénomènes de froissement et de dé-froissement de tissus en coton et en lin.

L'étude porte sur la conduite expérimentale du dé-froissement hydro-thermique, qualifié dans le langage courant de repassage de vêtement. Le froissement des tissus soumis à l'étude est opéré selon la méthode standard de « Cylindre creux » NF G07-125. L'évaluation objective des états de surfaces textile froissées et repassées se fait grâce à une méthode numérique novatrice dans le domaine du repassage de vêtements et consiste en un scan 3D et analyse d'image des surfaces textiles soumises à l'étude.

Afin d'établir un protocole expérimental précis permettant d'explicitier les mécanismes de froissement-dé-froissement, une caractérisation structurale et morphologique des matériaux utilisés a été nécessaire car les corrélations structure-propriétés, dans ce domaine, sont incontournables en particulier les propriétés thermomécaniques et hygroscopiques.

Pour ce faire, nous avons étudié les comportements thermiques des étoffes et des propriétés viscoélastiques en suivant la relaxation mécanique des éprouvettes en coton et en lin après repassage.

Les résultats obtenus nous ont permis de proposer un modèle de propagation de chaleur dans les étoffes repassées. Il est à noter que le mode de transfert thermique est le paramètre pertinent dans l'opération de repassage. Les résultats issus du suivi de la relaxation mécanique des tissus repassés ont montré que celle-ci a lieu en deux temps et modélisable par un modèle mécanique analogique de type Maxwell à deux temps de relaxation. Il ressort de l'étude de la relaxation de la contrainte que le dé-froissement n'est stable dans le temps et qu'un retour à l'état partiellement froissé d'un tissu sans intervention externe est possible. La vitesse de retour à état très relaxé dépendra des conditions de repassage et de stockage de l'étoffe.

**Mots clés :** *Froissement des textiles cellulosiques, évaluation objective de froissement, Relaxation après repassage, modélisation de transfert thermique.*

## Abstract

Apparel and textiles creasing is an undesirable visual feature. Cellulose-based garments are more prone to wrinkling than other fabrics, despite their excellent wearing characteristics such as comfort, softness, breathability etc.

The work in this thesis is part of a perspective of study, analysis and understanding of the phenomena of creasing and wrinkling of cotton and linen fabrics.

The study focuses on the experimental conduct of hydrothermal de-creasing, known in everyday language as garment ironing. The creasing of the fabrics object of the study was carried out according to the standard NF G07-125 cylindre-creux method. The objective evaluation of the wrinkled and ironed textile surface is carried out using an innovative digital method in the field of garment ironing and consists of a 3D scan and image analysis of the linen and cotton fabrics surfaces.

In order to establish a precise experimental protocol allowing to explain the wrinkling/de-wrinkling mechanisms, a structural and morphological characterization of the materials used was necessary because the structure-properties correlations, in this field, are essential, in particular the thermomechanical and hygroscopic properties.

For this purpose, we studied the thermal properties of the fabrics according to two heat transfer modes and the viscoelastic properties by following the mechanical relaxation of cotton and linen specimens after ironing. A mathematical model for the heat transfer through the fabrics is proposed. It should be noted that the heat transfer mode is the relevant parameter in the ironing process. The results of the monitoring of the mechanical relaxation of the ironed fabrics showed that this relaxation exhibits two stages. These can be modelled by a mechanical system of the Maxwell type with two relaxation times. The study of stress relaxation shows that the wrinkling is not stable over time and that a return to the partially wrinkled state of a fabric without external intervention is possible. The speed of return to a highly relaxed state will depend on the ironing and storage conditions of the fabric.

**Keywords:** *Wrinkling of cellulosic textiles, objective assessment of wrinkling, relaxation after ironing, heat transfer modelling.*