



HAL
open science

Caractérisation des mécanismes d'endommagement du stratum corneum induit par le frottement répété de papiers en cellulose

Coralie Thieulin

► **To cite this version:**

Coralie Thieulin. Caractérisation des mécanismes d'endommagement du stratum corneum induit par le frottement répété de papiers en cellulose. Autre. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSEE001 . tel-01753087

HAL Id: tel-01753087

<https://theses.hal.science/tel-01753087>

Submitted on 29 Mar 2018

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

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



N° d'ordre NNT : 2017LYSEE001

THESE de DOCTORAT **DE L'UNIVERSITE DE LYON**
opérée conjointement
au sein de l'École centrale de Lyon
et de l'École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne

Ecole Doctorale N° 488
Science Ingénierie Santé

Spécialité
Mécanique et Ingénierie

Soutenue publiquement le 16/06/2017, par :
Coralie Thieulin

CARACTERISATION DES MECANISMES
D'ENDOMMAGEMENT DU STRATUM
CORNEUM INDUIT PAR LE FROTTEMENT
REPETE DE PAPIERS EN CELLULOSE

Devant le jury composé de :

Chabrand, Patrick	HDR/Pr	Aix-Marseille université	Président/Rapporteur
Briançon, Stéphanie	HDR/Pr	Université Claude Bernard	Rapporteuse
Didier, Clémentine	MCF/Dr	ENISE	Examinatrice
Nouguier, Cécile	MCF/Dr	Ecole Centrale Lyon	Examinatrice
Rosén, Bengt-Göran	HDR/Pr	Halmstad university	Examineur
Mofid, Yassine	MCF/Dr	Université de Tours	Examineur
Zahouani, Hassan	HDR/Pr	Ecole Centrale Lyon	Directeur de thèse
Pailler-Mattei, Cyril	HDR/Dr	Ecole Centrale Lyon	Co-directeur de thèse

Spécialités doctorales :
 SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL

Responsables :
 K. Wolski Directeur de recherche
 S. Drapier, professeur
 F. Gruy, Maître de recherche
 B. Guy, Directeur de recherche
 D. Graillet, Directeur de recherche
 O. Roustant, Maître-assistant
 O. Boissier, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environr	FAYOL
BENABEN	Patrick	PR1	Sciences et génie des matériat	CMP
BERNACHE-ASSOLLAN	Didier	PR0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean Pierre	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaid	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environr	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environr	FAYOL
BURLAT	Patrick	PR2	Génie Industriel	FAYOL
COURNIL	Michel	PR0	Génie des Procédés	DIR
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences et génie des matériat	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSSE	David	PR1	Sciences et génie des matériat	SMS
DESRAYAUD	Christophe	PR2	Mécanique et ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR0	Génie Industriel	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FEILLET	Dominique	PR2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Bernard	PR1	Sciences et génie des matériat	CIS
FORMISYN	Pascal	PR0	Sciences et génie de l'environr	DIR
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériat	CIS
GIRARDOT	Jean-jacques	MR(DR2)	Informatique	FAYOL
GOEURIOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environr	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HAN	Woo-Suck	CR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
INAL	Karim	PR2	Microélectronique	CMP
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environr	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
LI	Jean Michel		Microélectronique	CMP
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MONTHEILLET	Franck	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR2	Génie des Procédés	DFG
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	CR	Génie des Procédés	CIS
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)		FAYOL
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériat	SMS
SZAFNICKI	Konrad	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environr	CMP
TRIA	Assia		Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	MA(MDC)	Sciences et génie des matériat	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzystof	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
XIE	Xiaolan	PR0	Génie industriel	CIS

ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	PU	Génie des procédés	ENISE
DUBUJET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FEULVARCH	Eric	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériat	ENISE
HAMDI	Hédi	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SI LARBI	Amir	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE

PR 0	Professeur classe exceptionnelle	Ing.	Ingénieur
PR 1	Professeur 1 ^{ère} classe	MCF	Maître de conférences
PR 2	Professeur 2 ^{ème} classe	MR (DR2)	Maître de recherche
PU	Professeur des Universités	CR	Chargé de recherche

SMS	Sciences des Matériaux et des Structures
SPIN	Sciences des Processus Industriels et Naturels
FAYOL	Institut Henri Fayol
CMP	Centre de Microélectronique de Provence

Ces travaux ont fait l'objet des productions scientifiques suivantes :

- Articles de revue :

C. Thieulin, C. Pailler-Mattei, M. Djaghloul, A. Abdouni, R. Vargiolu, H. Zahouani, « Wear of stratum corneum as a result of repeated friction with textiles », *Wear*, Inpress, 2017.
(doi : [j.wear.2016.10.024](https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.10.024))

C. Thieulin, C. Pailler-Mattei, R. Vargiolu, S. Lancelot, H. Zahouani, « Study of the tactile perception of bathroom tissues: Comparison between the sensory evaluation by a handfeel panel and a tribo-acoustic artificial finger », *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 150, pp. 417-425, 2017.
(doi : [j.colsurfb.2016.11.006](https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.11.006))

- Présentations orales :

C. Thieulin, R. Vargiolu, C. Pailler-Mattei, H. Zahouani, « Compréhension du comportement tribologique de la peau lors du contact avec un textile », Xème congrès de la SF2iC, 30-31 janvier 2015, Lyon.

C. Thieulin, E. Amaied, M. Djaghloul, A. Abdouni, « Aging and gender effects on the mechanical properties of the skin of human finger: experimental and numerical approaches », 6th International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues, 6-10 December 2015, Waikoloa, Hawaii USA.

C. Thieulin, A. Abdouni, M. Djaghloul, R. Vargiolu, C. Pailler-Mattei, H. Zahouani, « Evaluation of cutaneous irritation and discomfort sensations induced by the repeated friction of celluloses tissues on the skin », International Society for Biophysics and Imaging the Skin, May 31st to June 3rd 2016, Lisboa, Portugal.

M. Ayadh, M-A. Abellan, R. Chatelin, C. Thieulin, M. Djaghloul, J-M. Bergheau, B. Sohm, H. Zahouani, « Contribution to the characterisation of viscoelastic properties of reconstructed human skin », 22nd Congress of the European Society of Biomechanics, June 2016, Lyon.

C. Thieulin, C. Pailler-Mattei, M. Djaghloul, A. Abdouni, R. Vargiolu, H. Zahouani, « Stratum corneum damage and skin irritation induced by the repeated friction of textiles on the skin », 3rd International Conference on BioTribology, 11-14 September 2016, London, UK.

C. Thieulin, C. Pailler-Mattei, M. Djaghloul, A. Abdouni, R. Vargiolu, H. Zahouani, "Effect of surface texture of facial tissues on the biotribological properties of human skin", MetProps2017, Juin 2017, Göteborg, Sweden.

- Présentations posters :

C. Thieulin, R. Vargiolu, C. Pailler-Mattei, H. Zahouani, « Caractérisation tribologique et vibratoire de l'interaction peau humaine / textiles non tissés », Journées Internationales Françaises de Tribologie 2015, Nantes.

C. Thieulin, C. Pailler-Mattei, H. Zahouani, « Intéraction papiers en cellulose / peau : comportement tribologique et vibratoire », Journée des doctorants de l'école doctorale SIS, juin 2015, Saint-Etienne.
1er prix Poster

Table des matières

Introduction générale	7
La peau humaine : structure et fonctions.....	9
1.1. Introduction.....	10
1.2. La peau : un organe multicouche	10
1.2.1. La surface cutanée	10
1.2.2. L'épiderme	11
1.2.2.1. Le stratum corneum.....	11
1.2.2.2. L'épiderme vivant	12
1.2.3. La jonction dermo-épidermique JDE	13
1.2.4. Le derme	14
1.2.4.1. Le derme papillaire	14
1.2.4.2. Le derme réticulaire.....	14
1.2.5. L'hypoderme	14
1.2.6. La microcirculation cutanée.....	14
1.3. La peau : un organe protecteur	15
1.3.1. L'épiderme : une barrière hydrique.....	15
1.3.2. L'épiderme : une barrière physique.....	16
1.3.3. L'épiderme : une barrière antimicrobienne.....	17
1.4. La peau : un organe sensoriel.....	17
1.4.1. Les différents types de sensibilités	17
1.4.2. Les récepteurs sensoriels cutanés	18
1.4.2.1. Les mécanorécepteurs	18
1.4.2.2. Les thermorécepteurs	19
1.4.2.3. Les nocicepteurs	19
1.5. Conclusion	19
Evaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose	21
2.1. Introduction et objectifs	23
2.2. Les papiers en cellulose.....	23
2.2.1. Composition	23
2.2.1.1. Du bois à la fibre en cellulose	23
2.2.1.2. De la fibre de cellulose à la pâte à papier.....	24
2.2.2. Processus de fabrication des papiers en cellulose.....	25
2.2.2.1. De la pâte à papier à la feuille de base.....	25
2.2.2.2. De la feuille de papier au produit fini	27
2.2.3. Définition de la qualité tactile d'un papier en cellulose	28
2.2.4. Conclusion.....	28
2.3. Evaluation de la qualité sensorielle.....	28
2.3.1. La perception tactile	28
2.3.2. Evaluation de la perception tactile dans la littérature.....	29
2.3.2.1. Perception tactile des textiles.....	29
2.3.2.2. Perception tactile des papiers en cellulose	30
2.4. Développement de dispositifs d'évaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose .	30
2.4.1. Dispositifs d'évaluation de la douceur des papiers en cellulose.....	30
2.4.1.1. Le doigt humain instrumenté.....	30

2.4.1.2.	<i>Le doigt artificiel</i>	32
2.4.2.	<i>Dispositif d'analyse de la surface des papiers en cellulose</i>	34
2.4.2.1.	<i>Le microscope confocal</i>	34
2.4.2.2.	<i>L'analyse en ondelettes</i>	35
2.5.	Préparation des échantillons	37
2.5.1.	<i>Echantillons de papiers en cellulose utilisés pour l'étude</i>	37
2.5.2.	<i>Protocole de toucher des papiers en cellulose</i>	38
2.6.	Résultats	38
2.6.1.	<i>Evaluation de la douceur des papiers en cellulose</i>	39
2.6.1.1.	<i>Evaluation avec le doigt humain instrumenté</i>	39
2.6.1.2.	<i>Evaluation avec le doigt artificiel</i>	41
2.6.1.3.	<i>Comparaison doigt humain instrumenté versus doigt artificiel</i>	42
2.6.2.	<i>Analyse de la surface des papiers en cellulose</i>	43
2.6.2.1.	<i>Topographie des papiers en cellulose</i>	44
2.6.2.2.	<i>Comparaison des spectres SMA des papiers en cellulose</i>	44
2.6.3.	<i>Signature des papiers en cellulose en fonction des paramètres quantitatifs mesurés</i>	46
2.6.3.1.	<i>Le niveau acoustique moyen : indicateur de la douceur des papiers</i>	46
2.6.3.2.	<i>Le coefficient de frottement : indicateur de la « pilosité » des papiers</i>	46
2.7.	Conclusion	46
	L'irritation de la peau : observation et méthodes d'évaluation	49
3.1.	Introduction	50
3.2.	Evaluation de l'irritation cutanée et de l'endommagement de la fonction barrière de la peau dans la littérature	50
3.2.1.	<i>Signes d'irritation de la peau</i>	50
3.2.2.	<i>Dispositifs d'évaluation de l'irritation cutanée et de l'endommagement de la fonction barrière dans la littérature</i>	50
3.2.2.1.	<i>Observation visuelle des signes d'irritation cutanée</i>	50
3.2.2.2.	<i>Méthodes biophysiques d'évaluation de l'irritation cutanée</i>	51
3.3.	Nouvelle approche de caractérisation mécanique de l'endommagement du <i>stratum corneum</i>	53
3.3.1.	<i>Motivation pour le développement d'une nouvelle méthode de caractérisation mécanique de l'endommagement du <i>stratum corneum</i></i>	53
3.3.2.	<i>Analyse des propriétés mécaniques de la peau par indentation sans contact</i>	54
3.3.2.1.	<i>Dispositif expérimental d'indentation sans contact</i>	54
3.3.2.2.	<i>Essais d'impact in vivo : paramètres d'essai</i>	55
3.3.2.3.	<i>Evaluation du module d'élasticité de la peau</i>	56
3.3.3.	<i>Protocole expérimental</i>	58
3.3.3.1.	<i>Description du panel pour l'étude</i>	58
3.3.3.2.	<i>Protocole</i>	58
3.3.3.3.	<i>Analyses statistiques</i>	58
3.3.4.	<i>Résultats de validation obtenus avec le dispositif d'indentation sans contact</i>	59
3.3.4.1.	<i>Effet de l'âge et du sexe sur les propriétés mécaniques de la peau</i>	59
3.3.4.2.	<i>Effet de l'altération du <i>stratum corneum</i> sur les propriétés mécaniques de la peau</i>	60
3.4.	Conclusion	62
	Tribologie de l'interaction des papiers en cellulose avec la peau	65
4.1.	Introduction et objectifs	66
4.2.	Frottement de textiles sur la peau : état de l'art	73
4.2.1.	<i>Propriétés tribologiques de la peau humaine</i>	73
4.2.1.1.	<i>Effet de l'effort normal</i>	73
4.2.1.1.	<i>Effet de la vitesse de frottement</i>	73

4.2.1.2.	<i>Effet de l'humidité de la peau</i>	74
4.2.1.3.	<i>Effet du site anatomique cutané, de l'ethnie, de l'âge et du genre</i>	74
4.2.2.	<i>Frottement de surfaces textiles sur la peau</i>	75
4.3.	Dispositif de frottement <i>in vivo</i> utilisé pour l'étude	75
4.3.1.	<i>Biotribomètre rotatif couplé à un vélocimètre laser</i>	75
4.3.2.	<i>Méthode d'analyse</i>	76
4.4.	Protocole expérimental	77
4.4.1.	<i>Panel</i>	77
4.4.2.	<i>Echantillons</i>	78
4.4.3.	<i>Paramètres d'essai</i>	78
4.5.	Résultats et Discussion	79
4.5.1.	<i>Effet de la force normale</i>	79
4.5.2.	<i>Effet de la vitesse de rotation</i>	81
4.5.3.	<i>Effet de l'âge et du genre</i>	82
4.5.3.1.	<i>Coefficient de frottement</i>	82
4.5.3.2.	<i>Niveau vibratoire moyen</i>	86
4.5.4.	<i>Effet de la qualité tactile des papiers en cellulose</i>	88
4.5.4.1.	<i>Coefficient de frottement</i>	88
4.5.4.2.	<i>Niveau vibratoire moyen</i>	88
4.6.	Conclusion	89
Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété de papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement		91
5.1.	Introduction et objectifs	92
5.2.	Etude de l'irritation cutanée induite par le frottement répété de papiers en cellulose sur la peau : frottement à sec	92
5.2.1.	<i>Protocole expérimental</i>	92
5.2.1.1.	<i>Frottement répété des papiers en cellulose : paramètres d'essai</i>	92
5.2.1.2.	<i>Méthodes d'évaluation de l'irritation cutanée</i>	93
5.2.1.3.	<i>Etapas du protocole expérimental</i>	95
5.2.2.	<i>Résultats et Discussion</i>	96
5.2.3.	<i>Conclusion</i>	99
5.3.	Etude l'irritation cutanée induite par le frottement répété de papiers en cellulose sur la peau : frottement en conditions humides	100
5.3.1.	<i>Protocole expérimental</i>	100
5.3.1.1.	<i>Frottement répété des papiers en cellulose : paramètres d'essai</i>	100
5.3.1.2.	<i>Méthodes d'évaluation de l'irritation cutanée</i>	100
5.3.1.3.	<i>Etapas du protocole expérimental</i>	100
5.3.2.	<i>Résultats et Discussions</i>	102
5.3.2.1.	<i>Taux d'hydratation de la peau</i>	102
5.3.2.2.	<i>Coefficients de frottement</i>	103
5.3.2.3.	<i>Evolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau suite au frottement répété en conditions humides</i>	105
5.3.3.	<i>Conclusion</i>	107
5.4.	Conclusion sur le chapitre	107
Conclusion générale		109

Introduction générale

« La peau, naguère ravalée au rang de vulgaire sac tout juste bon à se couvrir de papules et de pustules, suscite aujourd'hui un bouillonnement de recherches et révèle un organe d'une fascinante complexité » (Philippe Testard-Vaillant ; Un organe d'une fascinante complexité ; Le Journal du CNRS, n°173, 2004). En effet, loin d'être une simple enveloppe pour notre corps, elle constitue une frontière mécanique, physique, chimique et immunologique d'une remarquable efficacité. Néanmoins, dans la vie de tous les jours, le frottement répété de la peau, notamment contre des surfaces textiles, peut engendrer l'apparition de sensations d'inconfort et d'irritation cutanée. En particulier, en période de rhume, les frottements à répétition des mouchoirs en papier sur le nez fragilisent la peau et peuvent provoquer des irritations parfois douloureuses.

Pour la société SCA *Care of Life*, qui développe et fabrique des papiers en cellulose destinés à l'hygiène personnelle (mouchoirs en papier, papier hygiénique, lingettes...), il est essentiel de répondre aux nouvelles attentes des consommateurs en termes de confort à l'usage et de santé de la peau. Pour le consommateur, le papier en cellulose doit, à la fois, être doux au toucher et confortable à l'usage même lors d'une utilisation répétée. Dans ce contexte, nous proposons de décomposer cette étude en deux grands axes de recherche, répondant chacun à un besoin industriel : la caractérisation de la qualité tactile (douceur) des papiers en cellulose puis l'évaluation de l'irritation et de l'endommagement de la peau suite à un frottement répété de ces papiers.

Cette étude se compose de cinq chapitres :

Le *premier chapitre*, qui s'appuie sur un travail de recherche bibliographique, sera consacré à la présentation générale de la peau, en tant qu'organe multicouche, protecteur et sensoriel. Nous détaillerons en particulier la structure particulière de la peau, depuis la surface jusqu'en profondeur. Nous nous intéresserons ensuite à sa fonction barrière assurée en grande partie par l'épiderme. Enfin, nous présenterons les différents récepteurs sensoriels cutanés.

Le *deuxième chapitre* sera dédié à l'évaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose. Dans une première partie bibliographique, nous mettrons en évidence la diversité des papiers en cellulose engendrée par des compositions fibreuses et des procédés de fabrication différents. Nous nous intéresserons ensuite à leur perception tactile. Une seconde partie sera dédiée à l'évaluation expérimentale de la qualité tactile des papiers en cellulose, par une approche tribo-acoustique. Nous présenterons les résultats obtenus avec deux dispositifs de frottement développés au laboratoire. Les paramètres physiques mesurés grâce à ces dispositifs seront ensuite comparés aux critères sensoriels qualitatifs définis par un panel sensoriel.

Les chapitres suivants seront consacrés à l'étude de l'interaction des papiers en cellulose, sélectionnés dans le chapitre 2, avec la peau *in vivo*.

Le *troisième chapitre* s'intéressera aux méthodes d'évaluation de l'irritation cutanée. Après avoir présenté les différentes techniques biophysiques d'évaluation de l'irritation cutanée, nous présenterons un nouveau dispositif de caractérisation mécanique de l'endommagement du *stratum corneum*. Nous validerons l'efficacité du dispositif à caractériser mécaniquement l'endommagement du *stratum corneum* induit par « tape-stripping ».

Le *quatrième chapitre* sera dédié à l'étude des propriétés tribologiques de l'interaction entre la peau et les papiers en cellulose. Nous présenterons le tribomètre rotatif *in vivo* développé pour l'étude. Nous étudierons en particulier l'effet des conditions de frottement (vitesse de frottement et

effort normal appliqué sur la peau), de l'âge et du genre du volontaire. A partir des résultats, nous choisirons les conditions expérimentales pour le test de frottement répété du dernier chapitre.

Le *cinquième chapitre* traitera de l'évaluation de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose sélectionnés. Nous étudierons entre-autres l'effet de la qualité tactile du papier en cellulose (définie dans le chapitre 2), des caractéristiques du volontaire (âge, genre) et des conditions d'humidité du frottement (sec ou en présence de liquide). L'évaluation de l'irritation se fera grâce aux dispositifs présentés dans le chapitre 3.

Chapitre 1

La peau humaine : structure et fonctions

Sommaire

1.1.	Introduction	10
1.2.	La peau : un organe multicouche.....	10
1.2.1.	La surface cutanée	10
1.2.2.	L'épiderme.....	11
1.2.2.1.	<i>Le stratum corneum</i>	<i>11</i>
1.2.2.2.	<i>L'épiderme vivant.....</i>	<i>12</i>
1.2.3.	La jonction dermo-épidermique JDE	13
1.2.4.	Le derme.....	14
1.2.4.1.	<i>Le derme papillaire</i>	<i>14</i>
1.2.4.2.	<i>Le derme réticulaire</i>	<i>14</i>
1.2.5.	L'hypoderme.....	14
1.2.6.	La microcirculation cutanée	14
1.3.	La peau : un organe protecteur	15
1.3.1.	L'épiderme : une barrière hydrique	15
1.3.2.	L'épiderme : une barrière physique	16
1.3.3.	L'épiderme : une barrière antimicrobienne.....	17
1.4.	La peau : un organe sensoriel	17
1.4.1.	Les différents types de sensibilités.....	17
1.4.2.	Les récepteurs sensoriels cutanés	18
1.4.2.1.	<i>Les mécanorécepteurs</i>	<i>18</i>
1.4.2.2.	<i>Les thermorécepteurs</i>	<i>19</i>
1.4.2.3.	<i>Les nocicepteurs.....</i>	<i>19</i>
1.5.	Conclusion.....	19

1.1. Introduction

La peau est un organe formé d'un tissu résultant d'un assemblage de cellules. Avec les phanères (ongles, poils), elle forme un tégument externe (du latin *tegumentum*, couverture) qui constitue l'enveloppe de notre corps, le protégeant du milieu extérieur. Elle est également l'organe le plus visible et le plus vaste de notre organisme avec une surface moyenne de 1,8 m² et un poids d'environ 3,5 kg chez l'homme adulte de 70 kg. Enfin, sa structure complexe lui confère de multiples fonctions essentielles pour l'individu.

Dans ce chapitre, la peau sera décrite en tant qu'organe multicouche, protecteur et sensoriel.

Les informations utilisées dans ce chapitre proviennent en grande partie des ouvrages [1]–[3]. Les autres références utilisées sont citées.

1.2. La peau : un organe multicouche

La structure générale de la peau est celle d'un tissu stratifié en trois couches principales qui sont, de la surface vers la profondeur : l'épiderme, le derme et l'hypoderme (Figure 1). L'épiderme constitue une barrière physique et chimique entre le corps et l'environnement extérieur. Le derme est le tissu nourricier et de soutien de la peau. Enfin, l'hypoderme joue le rôle d'isolant thermique, de protection contre les chocs et de réservoir énergétique.

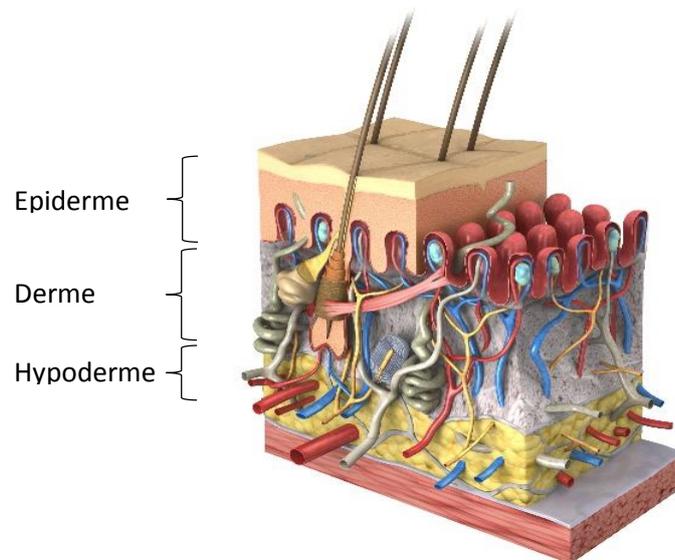


Figure 1 : Représentation schématique de la structure de la peau humaine (www.carecreations.basf.com)

1.2.1. La surface cutanée

La surface de la peau n'est pas réellement en contact direct avec l'environnement extérieur puisqu'elle est recouverte par un film hydrolipidique. L'épaisseur de ce film discontinu varie de 0,5 µm sur l'intérieur de l'avant-bras à environ 5 µm au niveau du front. Il s'agit d'une émulsion de type eau/huile composée par :

- Les produits de dégradation des kératinocytes et de la kératine issue de la desquamation des cellules cornées
- Une fraction hydrosoluble d'origine sudorale contenant 98% d'eau provenant de la sécrétion sudorale et de la perspiration cutanée, des substances organiques (urée, ammoniac, acides aminés, vitamines, glucose, acides lactique et pyruvique), des

substances hydrosolubles (chlorure de sodium, potassium, calcium, magnésium) et des substances exogènes

- Une fraction liposoluble composée du sébum et du cholestérol libéré lors de la kératinisation.

Les acides lactique et pyruvique donnent au film hydrolipidique son caractère acide avec un pH situé entre 4,2 et 6,1 [4].

1.2.2. L'épiderme

L'épiderme est un épithélium de revêtement pavimenteux (ses cellules sont plus larges que hautes sauf pour le *stratum germinativum*), stratifié et kératinisé. Il est composé de quatre à cinq couches superposées qui sont, de la surface vers la profondeur : le *stratum corneum*, le *stratum lucidum* (seulement présent dans les épidermes épais), le *stratum granulosum*, le *stratum spinosum* et le *stratum germinativum* (Figure 2). Son épaisseur moyenne est de 100 µm mais elle varie selon les régions anatomiques.

L'épiderme se régénère continuellement et ce renouvellement constant est réalisé grâce aux cellules épidermiques basales (kératinocytes basaux) qui ont la capacité de se diviser et générer des cellules filles. Ces cellules filles entament ensuite un processus de différenciation appelé kératinisation ou cornification. Durant ce processus, les kératinocytes migrent vers la surface de l'épiderme et subissent diverses transformations jusqu'à atteindre la couche cornée. Le renouvellement de l'épiderme se fait en 28 jours, c'est-à-dire que trois semaines sont nécessaires pour qu'une cellule de la couche basale arrive au *stratum corneum* et meurt (processus de desquamation).

L'épiderme se compose d'une part de l'épiderme vivant où a lieu le processus de kératinisation, et d'autre part du *stratum corneum* constitué de cellules mortes appelées cornéocytes.

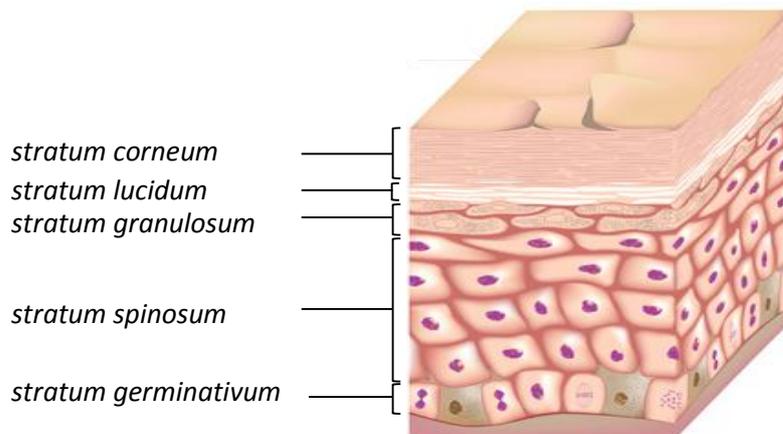


Figure 2 : Représentation schématique des différentes couches de l'épiderme (www.e-cancer.fr)

1.2.2.1. Le *stratum corneum*

Le *stratum corneum* (ou couche cornée) est la couche la plus superficielle qui ne constitue qu'une infime partie de l'épiderme. Il est le résultat ultime du processus de kératinisation [5]. Cette couche est constituée de l'empilement de cellules anucléées très plates, appelées cornéocytes, reliées entre elles par des desmosomes. L'ensemble est entouré d'une matrice riche en lipides qui remplit l'espace intercellulaire. Ainsi, de par sa composition, le *stratum corneum* est généralement représenté comme une structure « briques - mortier », où les briques représentent les cornéocytes et le ciment, la matrice lipidique [6]–[8] (Figure 3). L'épaisseur entière du *stratum corneum* est de l'ordre de 15-20 µm.

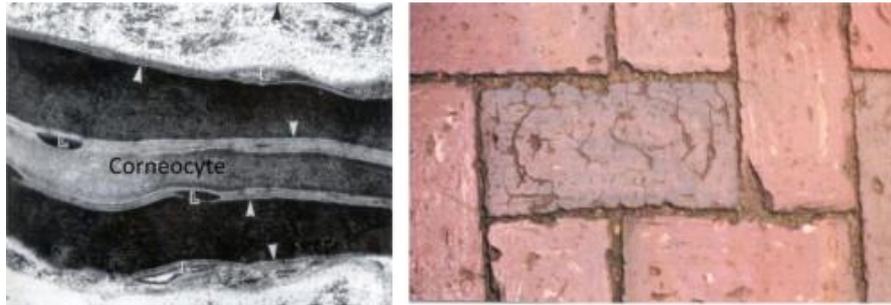


Figure 3 : Structure "briques - mortier" du stratum corneum (G.K. Menon, 2012)

Les cornéocytes

Le *stratum corneum* est composé d'un empilement de 15 à 20 couches de cornéocytes en fonction de la région anatomique. Ces cornéocytes résultent de l'ultime phase de différenciation des kératinocytes présents dans l'épiderme vivant. Leurs composants cellulaires (mitochondries, noyau...) et leur cytoplasme ont disparu au cours du processus de cornification [9]. Ce sont des cellules aplaties et complètement kératinisées, elles sont remplies de kératine présentes sous forme de faisceaux de filaments [10]. Ces kératines jouent un rôle cyto-architectural important [11]. La cohésion de ces cellules entre elles est assurée par des attaches de nature protéique appelées cornéodesmosomes [12]. Ces cornéodesmosomes sont programmés pour passer par un processus de dégradation progressive de manière à permettre la desquamation des cornéocytes usés [13], [14].

La matrice lipidique

La matrice lipidique présente entre les cornéocytes est composée de céramides, d'acides gras et de cholestérol présents en quantités approximativement équimolaires. La plupart de ces lipides sont synthétisés par les kératinocytes au niveau du *stratum spinosum* et du *stratum granulosum*. Contrairement à ce que laisse penser l'appellation « ciment », cette matrice lipidique n'est pas amorphe mais bien organisée. En effet, des études au microscope électronique ont révélé que les lipides étaient arrangés en structures lamellaires à la surface des cornéocytes [9], [15]–[19]. Plus récemment, l'organisation des lipides a été étudiée par diffraction des rayons X et a révélé deux phases lamellaires : une de périodicité 6,4 nm et une seconde de périodicité 13,4 nm [20]–[23]. La plupart des lipides sont dans un état cristallin (arrangement orthorhombique) et quelques lipides sont à l'état de gel (arrangement hexagonal) au niveau de la surface du *stratum corneum*. Cette structure très stable constitue une barrière efficace contre les agressions extérieures [24].

1.2.2.2. L'épiderme vivant

L'épiderme vivant se situe juste en dessous de la couche cornée. C'est une couche d'épaisseur variable, de 50 μm à 100 μm selon les régions anatomiques, continuellement renouvelée à partir des cellules de la couche basale. Si les kératinocytes représentent la population majoritaire des cellules épidermiques, d'autres cellules sont également présentes comme les cellules de Langerhans (système immunitaire), les mélanocytes (pigmentation de la peau) et les cellules de Merkel (récepteurs sensoriels) [25].

L'épiderme est constitué de plusieurs couches qui correspondent chacune à un stade de différenciation des kératinocytes.

Stratum germinativum ou couche basale

La couche basale ou *stratum germinativum* est la plus profonde de l'épiderme. C'est le compartiment prolifératif où naissent les kératinocytes. Les cellules germinatives se divisent pour donner naissance à deux cellules filles, l'une d'elle reste en place pour se diviser de nouveau et la seconde entame le processus de différenciation [5]. Les kératinocytes basaux ne forment qu'une seule assise de cellules cubiques qui repose sur une lame basale formant la jonction dermo-épidermique. Ces cellules adhèrent à la membrane basale par leur face inférieure grâce aux hémidesmosomes (structures protéiques) [26].

Stratum spinosum ou couche épineuse

Le *stratum spinosum* ou couche épineuse (5 à 15 couches de cellules) est composé de kératinocytes polygonaux dans les couches inférieures qui s'aplatissent au fur et à mesure de leur migration vers les couches supérieures. Ces cellules sont connectées entre elles par des desmosomes qui les font apparaître hérissées d'épines sur une coupe histologique (d'où l'appellation de couche épineuse). Les attaches desmosomales assurent une grande cohésion entre les cellules et confèrent une grande résistance mécanique à cette couche cellulaire. Dans cette couche, les mitoses cessent et la phase de maturation terminale des kératinocytes est initiée. Dans les couches supérieures, des granules apparaissent dans le cytosol (phase liquide du cytoplasme) marquant ainsi la transition avec le *stratum granulosum* [25].

Stratum granulosum ou couche granuleuse

Le *stratum granulosum* est composé d'environ 3 couches de kératinocytes aplatis. Dans cette couche, les kératinocytes sont en cours d'apoptose (mort cellulaire programmée), ils sont de plus en plus aplatis et leur noyau commence à dégénérer. Des granules font leur apparition dans le cytoplasme des cellules : les granules intracellulaires de kératohyaline et les kératinsomes (ou corps d'Odland). Les kératinsomes migrent vers la périphérie de la cellule puis fusionnent avec leur membrane plasmique et déversent leur contenu dans les espaces intercellulaires. Il s'agit de lipides qui sont impliqués dans la matrice lipidique qui joue le rôle de « ciment » pour assurer la cohésion du *stratum corneum*.

Stratum lucidum ou couche claire

Cette couche est visible uniquement dans le cas de peaux épaisses. Elle est constituée d'une seule assise de cellules aplaties, anucléées et translucides (car le contenu intracellulaire a été dégradé).

1.2.3. La jonction dermo-épidermique

La jonction dermo-épidermique (JDE) est une région acellulaire qui apparaît, entre les kératinocytes basaux et le derme papillaire, comme une ligne ondulée, fine (0.5 à 1µm d'épaisseur), où alternent les saillies de l'épiderme dans le derme appelées « crêtes épidermiques » et les saillies du derme dans l'épiderme dites « papilles dermiques ». Elle est constituée de quatre couches qui sont, de l'épiderme vers le derme, la membrane plasmique des kératinocytes basaux qui contient les hémidesmosomes, la lamina lucida, la lamina densa et la zone fibrillaire qui contient des fibres d'ancrage [27].

De par sa structure, la JDE permet une solide adhésion entre le derme et l'épiderme grâce à la présence de complexes d'ancrage de l'épiderme vers le derme (au niveau des kératinocytes basaux), constitués par un hémidesmosome, des filaments d'ancrage, un épaissement de la lamina densa, des fibrilles d'ancrage et des plaques d'ancrage dermiques [28]. Elle constitue également une barrière sélective en contrôlant les échanges moléculaires et cellulaires entre les deux couches.

1.2.4. Le derme

Le derme, d'une épaisseur moyenne de 1 à 2 mm, est un tissu conjonctif composé d'une matrice extracellulaire produite par les cellules majoritaires du derme, les fibroblastes. Le derme héberge également des cellules du système immunitaire (des cellules dendritiques dermiques, des macrophages et des mastocytes), des vaisseaux lymphatiques ou sanguins, des nerfs et terminaisons nerveuses spécialisées (toucher) et des annexes épidermiques incluant les follicules pilo-sébacés (sauf au niveau de la plante des pieds et de la paume des mains) et les glandes sudoripares eccrines et apocrines. La matrice extracellulaire dermique est une structure complexe formée par un réseau organisé de fibres de collagène et de fibres élastiques, et d'une substance interstitielle composée d'un mélange de protéoglycanes, glycoprotéines, d'eau et d'acide hyaluronique. Les fibres de collagène, de par leur grande résistance, assurent l'intégrité structurale du tissu. Quant aux fibres élastiques (ou fibres d'élastine), elles participent à l'élasticité de la peau. On peut diviser le derme en deux parties qui diffèrent par l'organisation et la composition de leurs matrices extracellulaires respectives : le derme papillaire en surface et le derme réticulaire en dessous [29].

1.2.4.1. *Le derme papillaire*

Le derme papillaire s'enchevêtre avec l'épiderme par les papilles dermiques (ou crêtes épidermiques). C'est un tissu conjonctif lâche qui se compose de fines fibrilles de collagène isolées et orientées dans le sens perpendiculaire à la JDE. Des fibres élastiques, également orientées perpendiculairement à la JDE, forment des structures en chandelle.

1.2.4.2. *Le derme réticulaire*

Le derme réticulaire est un tissu conjonctif plus dense. Il se compose d'un enchevêtrement de faisceaux de grosses fibres de collagène et de fibres élastiques préférentiellement orientées parallèlement à la surface cutanée. Cette richesse en fibres lui confère une grande résistance mécanique [30].

1.2.5. L'hypoderme

L'hypoderme fait la transition entre le derme et les tissus sous-jacents. Il est rattaché au derme par des fibres de collagène et des fibres élastiques, formant ainsi un tissu conjonctif lâche. Il est essentiellement constitué d'adipocytes, cellules spécialisées dans l'accumulation de lipides, et arrangées en lobules délimités par des parois de tissu conjonctif. L'hypoderme joue un rôle fondamental dans l'amortissement des chocs, la régulation de la température du fait du caractère isolant de la graisse, et la régulation de l'homéostasie énergétique en fonction des besoins métaboliques (stockage/libération des lipides) [25], [31].

1.2.6. La microcirculation cutanée

Dans la peau, le derme et l'hypoderme sont richement vascularisés par un réseau sanguin très organisé. Au contraire, l'épiderme, comme tout épithélium, n'est pas vascularisé et a besoin d'un réseau nutritif. C'est le derme qui est la principale structure nourricière de la peau [32].

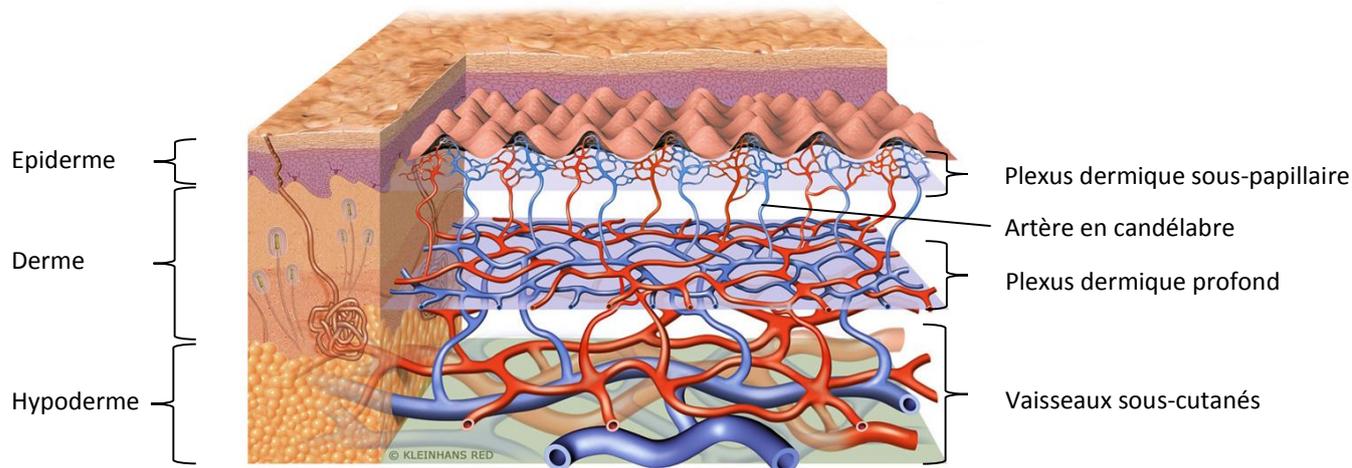


Figure 4 : Schématisation de la microcirculation cutanée : en bleu, le réseau veineux et en rouge, le réseau artériel (www.carecreations-basf.com)

Comme dans la circulation sanguine en général, il existe un réseau artériel et un réseau veineux (Figure 4). Les artères sous-cutanées traversent l'hypoderme et forment, au niveau de la jonction hypoderme/derme, un premier réseau anastomotique (connecté) parallèle à la surface cutanée appelé plexus artériel sous-dermique. De ce premier réseau, partent perpendiculairement des branches destinées à vasculariser les glandes sudoripares et les follicules pilosébacés, ce sont les artérioles dites « artères en candélabre ». Ces branches se réunissent ensuite dans un second réseau situé à la jonction derme papillaire/derme réticulaire, il s'agit du plexus artériel sous-papillaire. De ce dernier réseau, partent des capillaires qui gagnent les papilles dermiques [33]. Les voies du réseau veineux sont calquées sur le modèle artériel : les veines sous-cutanées forment le plexus veineux dermique profond et les veinules qui en émanent le plexus veineux sous-papillaire. Dans les papilles dermiques, le réseau veineux est descendant (il véhicule le sang oxygéné du corps vers le cœur) contrairement au réseau artériel qui est ascendant (du cœur vers le reste du corps).

La microcirculation cutanée permet la nutrition de l'épiderme et des annexes cutanées, le maintien de la pression artérielle par un tonus vasoconstricteur, la thermorégulation, la tolérance par la peau à de longues périodes d'ischémie compressive et la participation aux processus inflammatoires et à la réactivité cutanée [3].

1.3. La peau : un organe protecteur

De par sa composition et sa structure, la peau forme une véritable barrière de protection de l'organisme contre l'environnement extérieur. En effet, la peau est constamment soumise à de multiples agressions de l'extérieur. Elles peuvent être d'ordre :

- physique : frottement, stress mécanique, changement de températures, rayonnements UV...
- chimique : solvants, allergènes...
- biologique : agents infectieux

Elle permet également de lutter contre la déshydratation cutanée en limitant l'évaporation de l'eau hors de l'organisme. Cette « fonction barrière » est principalement assurée par l'épiderme et le *stratum corneum*. L'épiderme joue ainsi le rôle de barrière hydrique, physique et antimicrobienne [34].

1.3.1. L'épiderme : une barrière hydrique

La barrière hydrique a pour fonction de maintenir un gradient d'eau entre les couches profondes de l'épiderme vivant et le *stratum corneum* [35]. L'épiderme humain contient entre 65 et 70% d'eau mais ce taux diminue en surface pour atteindre seulement 15% au niveau du *stratum*

corneum [12], [35], [36]. Ce gradient d'eau décroissant est à l'origine de la diffusion de l'eau libre des couches les plus profondes vers la surface. La diffusion se fait via les lipides intercornéocytaires du *stratum corneum*. Une altération de ces lipides entraîne une augmentation de la perte en eau. Un flux d'eau constant transite du derme jusqu'à la surface de la peau via deux étapes : une diffusion de l'eau du derme au *stratum corneum* puis son évaporation à la surface de la peau, il s'agit de la Perte Insensible en Eau (PIE). Cette PIE est un indicateur du degré d'altération du *stratum corneum* : une PIE trop élevée reflète un endommagement de la fonction barrière.

L'homéostasie hydrique est essentielle à l'équilibre physiologique de la peau, elle joue notamment un rôle dans l'élasticité et l'hydratation cutanées. Les lipides intercornéocytaires, les jonctions serrées et les composants du facteur naturel d'hydratation (NMF) ont pour mission de maintenir une bonne hydratation cutanée en diminuant l'évaporation de l'eau et en augmentant sa fixation lors de son passage dans le *stratum corneum* [37].

L'évaporation est limitée grâce aux lipides intercornéocytaires qui, organisés en feuillets, jouent le rôle essentiel de barrière hydrophobe dynamique [38], [39]. En particulier, les céramides, qui sont des molécules amphiphiles, s'organisent en bicouches lipidiques et créent un agencement lamellaire très stable, renforcé par la présence de longues chaînes carbonées et de liaisons hydrogènes reliant les céramides entre eux [40]. Le film hydrolipidique recouvrant la surface du *stratum corneum* freine également cette perte en eau.

Les jonctions serrées, localisées au niveau de la membrane des kératinocytes granuleux, assurent également une étanchéité presque totale de l'épiderme [41]. En effet, ces protéines transmembranaires permettent la fusion des membranes de cellules par interaction homophile et assurent ainsi un contact étroit entre deux cellules adjacentes.

Les cornéocytes sont quant à eux responsables de la fixation de l'eau de par leur richesse en kératine très hydrophile et en NMF ayant la propriété de retenir l'eau [37]. Le NMF est constitué à plus de 50% d'acides aminés libres et de leurs dérivés comme l'acide carboxylique pyrrolidone, dérivé de la glutamine, et l'acide urocanique, dérivé de l'histidine [42]. A cela s'ajoute des composants extracellulaires tels que l'acide lactique, l'urée et les sucres, tous issus de la sécrétion séborrhéique. De par ses propriétés hygroscopiques importantes, le NMF est capable de capter et retenir l'eau au sein de la matrice intracornéocytaire.

1.3.2. L'épiderme : une barrière physique

La peau est constamment soumise aux agressions physiques extérieures de type frottement ou stress mécanique. La résistance de l'épiderme face à ces sollicitations mécaniques est conférée par l'enveloppe cornée rigide qui renferme une matrice fibreuse extrêmement dense. De plus, la présence des cornéodesmosomes, qui lient les cornéocytes adjacents entre eux, renforce cette résistance mécanique.

Au cours du processus de kératinisation, la membrane plasmique des kératinocytes va progressivement être remplacée par une coque rigide et insoluble faite de protéines, l'enveloppe cornée [43]. Cette coque est constituée, au niveau interne, d'une couche protéique ordonnée (involucrine, loricrine et protéines riches en proline) liée de manière covalente aux filaments de kératine présents dans le cytoplasme des cornéocytes. Au niveau externe, elle est recouverte d'une structure lipidique constituée d'une monocouche d'acylcéramides qui interagit avec les lipides de la matrice intercornéocytaire. Les acylcéramides sont également liés de manière covalente, par liens ester, à la structure protéique interne de l'enveloppe cornée.

Si l'enveloppe cornée assure une bonne partie de la résistance mécanique de l'épiderme, la matrice fibreuse qui remplit le cytosquelette des cornéocytes participe également à cette fonction de protection. Cette matrice fibreuse est constituée d'un réseau très dense de filaments intermédiaires de kératine. Ces filaments de kératine s'agrègent entre eux grâce à la formation de liaisons ioniques sous l'action de la filaggrine [44], mais aussi grâce à des ponts disulfures.

Enfin, la fonction de barrière physique est complétée par la présence des cornéodesmosomes qui assurent la cohésion des cornéocytes adjacents entre eux et forment ainsi un réseau trans-cellulaire qui confère aux cornéocytes leur résistance [45].

La continuité entre les cornéodesmosomes, l'enveloppe cornée et la matrice fibreuse confère à l'épiderme sa fonction de barrière physique.

1.3.3. L'épiderme : une barrière antimicrobienne

La peau est particulièrement exposée aux micro-organismes, dont certains peuvent être pathogènes. Pour se prémunir de ces agressions, l'épiderme fournit une formidable barrière protectrice empêchant l'entrée des micro-organismes au niveau des tissus. La structure quasi-infranchissable du *stratum corneum* associée au processus de desquamation, qui assure l'élimination des cornéocytes de surface et des micro-organismes installés, forment une première barrière antimicrobienne efficace [46]. De plus, le pH acide (entre 4.2 et 6.1) et le faible taux d'humidité de la couche cornée, et la température de la peau inférieure à 37°C sont défavorables à la prolifération bactérienne. Enfin, la présence de peptides et lipides antimicrobiens font de l'épiderme un véritable défenseur contre l'infection.

Les virus et certaines bactéries peuvent cependant traverser le *stratum corneum*. Plusieurs types cellulaires, tels que les kératinocytes et les cellules de Langerhans, participent alors à la défense immunitaire. Dès qu'un agent extérieur est détecté à la surface de la peau, les kératinocytes synthétisent des peptides et des protéines antimicrobiens, dont les défensines, qui sont capables de contrôler la croissance bactérienne et éventuellement de lutter contre les infections. La plupart de ces peptides détruisent les organismes cibles en perturbant l'intégrité membranaire grâce à une interaction électrostatique avec les lipides [47]. Les cellules de Langerhans interviennent ensuite, elles fixent les agents indésirables puis les transmettent aux lymphocytes T, cellules tueuses qui vont déclencher leur élimination. Le derme contient une ligne de défense supplémentaire : les bactéries ou virus qui auraient échappé à la vigilance des cellules de Langerhans y sont détectés et supprimés par les macrophages [3].

1.4. La peau : un organe sensoriel

En contact direct avec le monde extérieur, la peau est un organe sensoriel majeur [48]. Elle est le principal site d'interaction de l'organisme avec son environnement. En effet, le système nerveux cutané reçoit et répond continuellement à différents stimuli (physique, chimique...) [49]. Le système nerveux cutané appartient au système nerveux périphérique constitué des nerfs par où circule l'information entre les organes et le système nerveux central. Il est constitué d'une voie afférente (transmission de l'information sur le milieu extérieur au système nerveux central) et d'une voie efférente (contrôle des fonctions eccrines, du flux sanguin et de l'érection pileaire) [50].

1.4.1. Les différents types de sensibilités

La peau appartient au système somesthésique (sensibilité aux stimuli autres que visuels, gustatifs, auditifs et olfactifs). La somesthésie, appelée aussi « sensibilité générale », permet au corps de percevoir son environnement et de savoir ce qu'il est en train de faire [51]. On distingue les sensations extéroceptives (sensibilité cutanée : tact (toucher), pression, chaleur...) des sensations proprioceptives (sensibilité de l'organisme à sa propre position et son propre mouvement). Enfin, au sein de la sensibilité cutanée, on retrouve la sensibilité mécanique, la sensibilité thermique et la sensibilité à la douleur ou nociception.

1.4.2. Les récepteurs sensoriels cutanés

Chacune des sensations est transmise à des récepteurs sensoriels spécifiques répartis à différents niveaux de la peau, en surface ou plus en profondeur. Leur répartition et leur densité dépendent des régions du corps et varient suivant qu'il s'agit d'une peau glabre ou non. On distingue plusieurs types de récepteurs dans la peau (Figure 5) : des terminaisons nerveuses libres, des terminaisons nerveuses encapsulées, des thermorécepteurs, des nocicepteurs.

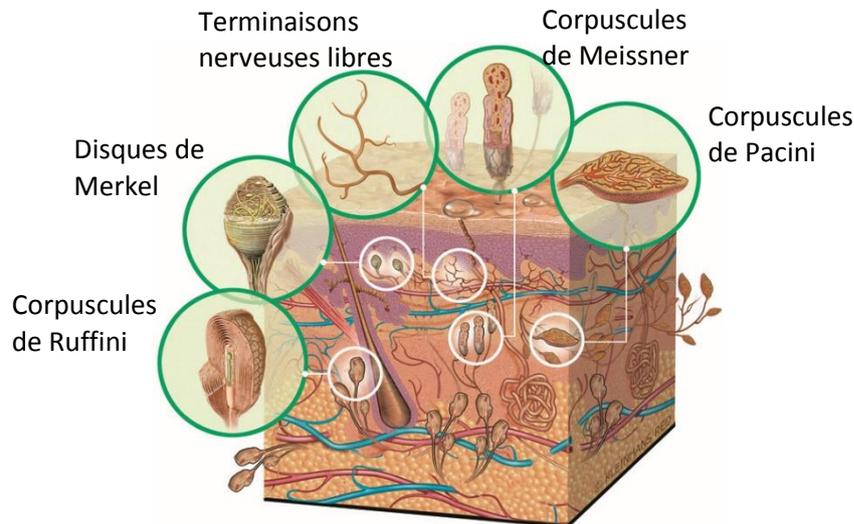


Figure 5 : Schématisation du système nerveux sensoriel de la peau (www.carecreations-basf.com)

1.4.2.1. Les mécanorécepteurs

Au sein de la sensibilité mécanique de la peau, on peut distinguer la sensibilité à la pression, à la vibration et au tact (toucher).

La sensibilité à la pression est déclenchée par des appuis importants sur la surface de la peau et est transmise par l'intermédiaire de récepteurs de pression à adaptation lente, appelés corpuscules de Ruffini et disques de Merkel. Ces récepteurs sont actifs dès le début de la stimulation mécanique et le restent jusqu'à la fin de celle-ci. Les corpuscules de Ruffini sont des mécanorécepteurs encapsulés d'environ 1 mm de diamètre localisés dans le derme moyen et les capsules articulaires [52]. Ils sont sensibles à la pression et à l'étirement de la peau [53]. Les disques de Merkel sont des récepteurs superficiels, situés à la base de l'épiderme. Ils sont composés de la terminaison en forme de disque d'une ramification d'une fibre myélinisée qui est associée à une cellule de Merkel. Ils répondent à des pressions localisées comme l'enfoncement de la peau [54].

Contrairement à la sensibilité à la pression, le tact correspond à un contact léger avec la peau. Les récepteurs sensoriels impliqués dans le tact sont des récepteurs de vitesses tels que les corpuscules de Meissner [55], [56]. Ces mécanorécepteurs se trouvent principalement dans les zones sensibles à la friction, en particulier dans la peau glabre. Ils sont situés directement sous l'épiderme au niveau des papilles dermiques et sont amarrés à la lame basale via des fibres élastiques. Ils sont constitués d'un empilement de cellules de Schwann entre lesquelles la fibre axonale passe en spirale ramifiée [56]–[58]. Ces mécanorécepteurs sont à adaptation rapide et particulièrement sensibles à la vitesse d'établissement du stimulus.

Enfin, la sensibilité à la vibration répond à des variations de pression dans une gamme de fréquences de 30 à 1500 Hz. Les mécanorécepteurs impliqués dans cette sensibilité sont les corpuscules de Pacini qui ont une sensibilité optimale autour de 300 Hz. Ils sont localisés dans le derme et l'hypoderme et sont particulièrement nombreux au niveau des doigts. Ces récepteurs sont constitués d'un axone myélinisé entouré de nombreuses lamelles

concentriques séparées par des espaces remplis de liquide interstitiel [58], [59]. Ils sont à adaptation rapide et uniquement sensibles aux variations rapides d'intensité, donc à l'accélération de la déformation cutanée.

1.4.2.2. *Les thermorécepteurs*

La sensibilité thermique correspond soit à la sensibilité au chaud, soit à la sensibilité au froid. Dans la peau, il existe des terminaisons nerveuses libres, situées vers les capillaires sanguins, qui sont sensibles au chaud ou au froid [60]. Les récepteurs au chaud, liés à des fibres amyéliniques de type C (fibres minces et peu rapides), sont situés en profondeur du derme. Au contraire, les récepteurs au froid, liés à des fibres amyéliniques fines, sont superficiels, localisés dans le derme.

La densité en thermorécepteurs est très variable d'une région cutanée à une autre et les points sensibles au froid sont plus nombreux que les points sensibles au chaud.

1.4.2.3. *Les nocicepteurs*

La nociception est le processus sensoriel à l'origine du message nerveux qui provoque la douleur [61]. Les nocicepteurs sont activés par des stimulations entraînant une lésion de l'organisme [62]. Il existe quatre types de ces récepteurs cutanés, essentiellement des terminaisons libres de fibres non myélinisées. Les nocicepteurs mécaniques répondent au pincement, à la torsion de la peau ou à la piqûre. Les nocicepteurs thermiques sont sensibles à des stimuli thermiques élevés, supérieurs à 45°C, ou très bas, inférieurs à 10°C. Les nocicepteurs polymodaux répondent à des stimuli thermiques et mécaniques. Enfin il existe des nocicepteurs sensibles aux agents chimiques.

1.5. Conclusion

Sur le plan structural, la peau est un organe multicouche composé de trois strates qui remplissent chacune des fonctions précises. La mission principale de la peau est de protéger l'organisme contre les agressions venant de l'extérieur qu'elles soient d'ordre physique, chimique ou biologique. Cette mission incombe principalement à l'épiderme et au *stratum corneum*, couche la plus en surface.

Outre sa fonction de protection, la peau apparaît également comme un organe sensoriel qui transmet des informations sur la température, la douleur et le toucher. Cette fonction intervient particulièrement dans la perception tactile d'objets. Cette perception est relayée par les récepteurs sensoriels situés sous l'épiderme. On relève la plus grande densité de récepteurs sensoriels au niveau de la main et des doigts. Ces récepteurs permettent d'appréhender la géométrie, la rugosité, la température et la texture de la surface d'objets.

Chapitre 2

Evaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose

Sommaire

2.1. Introduction et objectifs.....	23
2.2. Les papiers en cellulose.....	23
2.2.1. Composition	23
2.2.1.1. <i>Du bois à la fibre en cellulose.....</i>	<i>23</i>
2.2.1.2. <i>De la fibre de cellulose à la pâte à papier.....</i>	<i>24</i>
2.2.2. Processus de fabrication des papiers en cellulose	25
2.2.2.1. <i>De la pâte à papier à la feuille de base.....</i>	<i>25</i>
2.2.2.2. <i>De la feuille de papier au produit fini.....</i>	<i>27</i>
2.2.3. Définition de la qualité tactile d'un papier en cellulose	28
2.2.4. Conclusion	28
2.3. Evaluation de la qualité sensorielle	28
2.3.1. La perception tactile	28
2.3.2. Evaluation de la perception tactile dans la littérature.....	29
2.3.2.1. <i>Perception tactile des textiles</i>	<i>29</i>
2.3.2.2. <i>Perception tactile des papiers en cellulose</i>	<i>30</i>
2.4. Développement de dispositifs d'évaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose	30
2.4.1. Dispositifs d'évaluation de la douceur des papiers en cellulose	30
2.4.1.1. <i>Le doigt humain instrumenté.....</i>	<i>30</i>
2.4.1.2. <i>Le doigt artificiel</i>	<i>32</i>
2.4.2. Dispositif d'analyse de la surface des papiers en cellulose	34
2.4.2.1. <i>Le microscope confocal.....</i>	<i>34</i>
2.4.2.2. <i>L'analyse en ondelettes.....</i>	<i>35</i>
2.5. Préparation des échantillons.....	37
2.5.1. Echantillons de papiers en cellulose utilisés pour l'étude	37
2.5.2. Protocole de toucher des papiers en cellulose	38
2.6. Résultats	38
2.6.1. Evaluation de la douceur des papiers en cellulose	39
2.6.1.1. <i>Evaluation avec le doigt humain instrumenté</i>	<i>39</i>
2.6.1.2. <i>Evaluation avec le doigt artificiel.....</i>	<i>41</i>
2.6.1.3. <i>Comparaison doigt humain instrumenté versus doigt artificiel.....</i>	<i>42</i>
2.6.2. Analyse de la surface des papiers en cellulose	43
2.6.2.1. <i>Topographie des papiers en cellulose</i>	<i>44</i>
2.6.2.2. <i>Comparaison des spectres SMA des papiers en cellulose.....</i>	<i>44</i>

2.6.3.	Signature des papiers en cellulose en fonction des paramètres quantitatifs mesurés...	46
2.6.3.1.	<i>Le niveau acoustique moyen : indicateur de la douceur des papiers</i>	<i>46</i>
2.6.3.2.	<i>Le coefficient de frottement : indicateur de la « pilosité » des papiers.....</i>	<i>46</i>
2.7.	Conclusion.....	46

2.1. Introduction et objectifs

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'évaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose. Dans un premier temps, nous étudierons les papiers en cellulose, leur composition et leur procédé de fabrication. Nous mettrons en évidence la grande variété de qualités sensorielles des papiers en cellulose. Dans un deuxième temps, nous discuterons de l'état de l'art concernant la perception tactile des textiles et en particulier des papiers en cellulose. Enfin, nous présenterons l'étude réalisée sur les papiers en cellulose sélectionnés.

L'étude présentée a pour but de trouver des paramètres physiques capables de retranscrire quantitativement la douceur des papiers en cellulose. Pour cela, six échantillons ont été sélectionnés et analysés avec différentes méthodes.

2.2. Les papiers en cellulose

Les informations qui suivent ont été recueillies lors de visites et formations au centre de recherche et à l'usine SCA de Kunheim.

2.2.1. Composition

2.2.1.1. Du bois à la fibre en cellulose

Le bois constitue la matière principale pour la fabrication du papier. Il est constitué de trois parties qui sont les racines, le tronc et la cime (branches et feuilles). Les principales parties du tronc d'un arbre sont, depuis l'extérieur jusqu'à l'intérieur, l'écorce, le phloème (tissu conducteur de la cève), le cambium (lieu de production des couches de tissus cellulaires), l'aubier (bois vivant) et le bois de cœur (Figure 6) [63]. Les fibres de cellulose utilisées pour la fabrication du papier sont présentes dans le bois de cœur.

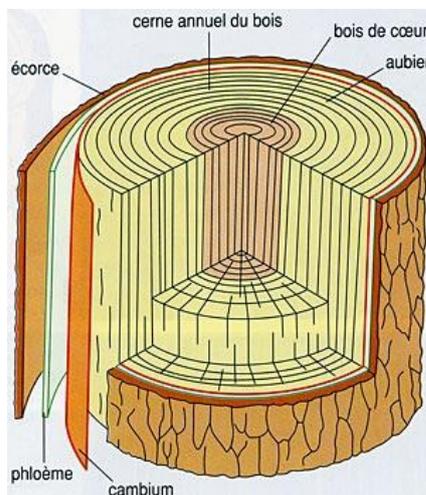


Figure 6 : Représentation schématique de la structure macroscopique d'un tronc d'arbre (<http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr>)

Les fibres de cellulose sont des tubes creux (Figure 7) aux caractéristiques morphologiques bien précises suivant le bois d'origine : elles peuvent être courtes, longues, plus ou moins larges et avec une paroi plus ou moins épaisse. Elles sont, par conséquent, utilisées pour la fabrication de différents types de papiers, selon l'usage attribué. En effet, la morphologie des fibres de cellulose est un paramètre essentiel pour les propriétés du papier en devenir. Elle dépend principalement de l'espèce de l'arbre : résineux (épicéa, pin) ou feuillu (eucalyptus). Les fibres cellulosiques provenant de résineux sont appelées « fibres longues », leur longueur pouvant atteindre de 2 à 4 mm. Ce type de

fibres apporte de la résistance au papier. Au contraire, les fibres de cellulose provenant des feuillus sont appelées « fibres courtes » (entre 0,5 et 1,5mm de long), elles donnent du gonflant (épaisseur) et de la douceur au papier. Pour une même espèce d'arbres, la morphologie des fibres varie selon son origine géographique, son âge et sa position au sein de l'arbre. Ainsi, un arbre en provenance du nord (Canada, Scandinavie), fournira des fibres aux parois fines et donnera ainsi de la souplesse au papier. A l'inverse, un arbre du sud (Brésil, Chili...) donnera des fibres à parois épaisses qui apporteront des propriétés d'absorption et de gonflant au papier.

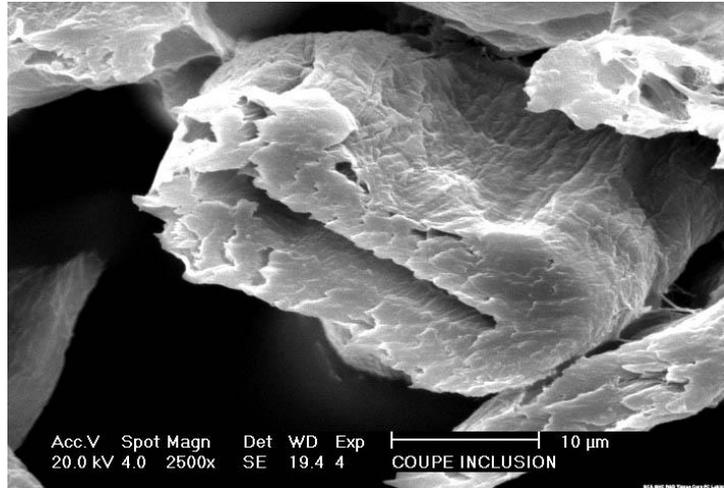


Figure 7 : Image d'une fibre cellulosique prise au Microscope Electronique à Balayage MEB (Image SCA, Kunheim)

2.2.1.2. De la fibre de cellulose à la pâte à papier

Le bois est constitué de cellulose (composant majoritaire), d'hémicellulose et de lignine. La cellulose est un polymère à longues chaînes sans ramification, composé d'unités de β -D-glucopyranose (forme de glucose) liées ensemble par des liaisons (1-4)- β -glycosidiques. Les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides contenant une ou plusieurs unités monosaccharides (monomère de glucide) différentes. Ce sont des polymères hydrophiles qui ont tendance à absorber l'eau et à gonfler. Ainsi, une forte teneur en hémicelluloses confère de la flexibilité aux fibres. La lignine est un polymère amorphe qui apporte de la rigidité en collant les fibres entre elles. En plus de sa rigidité, l'autre inconvénient de la lignine est la couleur jaunâtre qu'elle donne au papier (papier journal par exemple). Ainsi, il est essentiel d'éliminer la lignine pour rendre le papier blanc et plus doux.

Fabriquer la pâte à papier revient donc à libérer les fibres de cellulose de la lignine et à les individualiser, tout en les dégradant le moins possible. Cette séparation peut être obtenue soit par des moyens mécaniques, soit par action de réactifs chimiques [64]. Dans le cas d'un traitement mécanique, le bois est désintégré par l'action de meules et de disques. Sous l'échauffement et l'action de frottement, les fibres sont séparées, on parle de défibrage du bois. Ce procédé d'obtention de la pâte à papier a un fort rendement mais ne produit qu'une pâte de qualité médiocre (propriétés mécaniques altérées). Pour améliorer la séparation des fibres et obtenir une meilleure qualité de pâte, des traitements à la vapeur sont parfois utilisés pour ramollir la lignine et ainsi faciliter la séparation fibrillaire. C'est le cas des pâtes thermomécaniques (TMP). Dans le cas des pâtes chimicothermomécaniques (CTMP), ce sont des agents chimiques qui sont utilisés à une température de plus de 100°C. Pour le traitement chimique, le bois est cuit dans une lessiveuse avec une solution de cuisson (acide ou basique) et sous pression. Ainsi, tous les produits non cellulosiques, dont une grande partie de la lignine, sont éliminés et les fibres séparées. Ce procédé de séparation des fibres offre une bonne qualité de pâte mais son rendement est faible. Il existe également des traitements mixtes qui combinent un traitement chimique et un traitement mécanique. Suite à ces procédés, il reste plus ou moins de lignine dans la pâte qui est donc plus ou moins jaunâtre. Une étape de blanchiment est donc nécessaire (Figure 8).



Figure 8 : Différentes étapes de blanchiment de la pâte à papier (publicationpapers.sca.com)

En conclusion, le processus de fabrication de la pâte à papier influe grandement sur les propriétés de la feuille de papier finalement obtenue.

2.2.2. Processus de fabrication des papiers en cellulose

Il y a 2000 ans, le conseiller de l'empereur chinois Tsai Lun fut le premier à décrire la technique de fabrication du papier. Cette recette est encore d'actualité de nos jours : « la matière cellulosique, qui s'est décomposée dans l'eau, se lie lors du tamisage de l'eau, à l'aide d'une passoire, pour former un tissu de fibres entremêlées – le papier ».

2.2.2.1. De la pâte à papier à la feuille de base

Préparation

Les usines, qui ne fabriquent pas elles-mêmes leurs pâtes, reçoivent de la pâte en balles. La première opération de la fabrication de la feuille de papier est donc de mettre les fibres en suspension dans l'eau par une opération de désintégration dans des pulpeurs. La désintégration a pour but de désagréger la pâte jusqu'à l'obtention de fibres individualisées et hydratées. Cette étape est facilitée par le caractère hydrophile de la cellulose.

La préparation est ensuite raffinée pour améliorer les liaisons entre fibres et donc augmenter la résistance du futur papier [65]. Pour cela, la pâte est conduite entre deux disques en rotation opposée, garnis de lames. Les fibres sont hydratées (gonflement et assouplissement de la fibre) et fibrillées (arrachement partiel de la paroi externe de la fibre entraînant une augmentation de la surface et donc de la possibilité de créer des liaisons inter-fibres). Ce traitement conduit également à une coupe des fibres cellulosiques, phénomène qui n'est pas forcément recherché. Enfin, la pâte est épurée (élimination des impuretés), diluée pour diminuer sa concentration et des charges (adouçissant...) peuvent être ajoutées avant son arrivée sur la machine à papier en fonction des propriétés de papier attendues. A ce stade, la pâte est constituée à 99% d'eau et de matières de traitement et à 1% de fibres.

Machine à papier – Processus de pressage de la feuille

L'objectif de la machine à papier est d'enlever l'eau de la pâte à papier. Il s'agit d'un large dispositif comprenant une caisse de tête, une section toile, une section presses et une section sécherie. La caisse de tête distribue un flux contrôlé et régulier de pâte sur la partie suivant le sens de la machine à papier (sens marche). Une turbulence est créée dans cette partie pour éviter la floculation des fibres qui donnerait un papier de mauvaise qualité. La suspension fibreuse quitte ensuite la caisse de tête sous la forme d'un jet régulièrement réparti sur une toile ajourée afin que les fibres forment un matelas entrelacé : c'est la première étape du processus d'égouttage. Une seconde toile vient presser la partie supérieure de la suspension fibreuse au cours de son avancée sur la toile inférieure. La majorité des fibres s'orientent parallèlement au sens marche de la machine. Cette organisation des fibres induit une anisotropie des caractéristiques physiques du papier : le papier aura des caractéristiques différentes

selon le sens marche (sens de marche de la machine à papier) et le sens travers (perpendiculaire au sens marche). Une fois la feuille de papier formée, la section presse de la machine à papier permet de retirer d'avantage d'eau. Il s'agit d'une série de grands cylindres d'acier qui compriment la feuille afin de l'essorer. La feuille de papier est prise en sandwich entre deux feutres absorbants lors de son passage entre les cylindres de compression. Ces feutres agissent comme du papier buvard pour absorber l'eau. Le papier est ensuite soumis à un dernier processus de séchage.

Machine à papier – Processus de séchage de la feuille

Il existe différents types de séchage : un conventionnel dit CWP (« Conventional Tissue Making »), un procédé dit TAD (« Through Air Drying ») et un procédé hybride. On insistera en particulier sur le procédé CWP car les papiers utilisés dans ces travaux sont tous issus de ce procédé de fabrication.

Pour le procédé CWP, la feuille de papier est transférée sur un yankee sécheur (gros cylindre) chauffé à la vapeur à une pression de 6-7 bar et une température d'environ 100°C. Le contact entre la feuille et le yankee est assuré par un adhésif (coating) diffusé sur le cylindre. Une fois séchée, la feuille de papier est décollée du Yankee grâce à un racle de crêpage puis enroulée sur une bobine mère. La Figure 9 montre le procédé de crêpage du papier ainsi que la structure typique des crêpes pour un papier CWP.

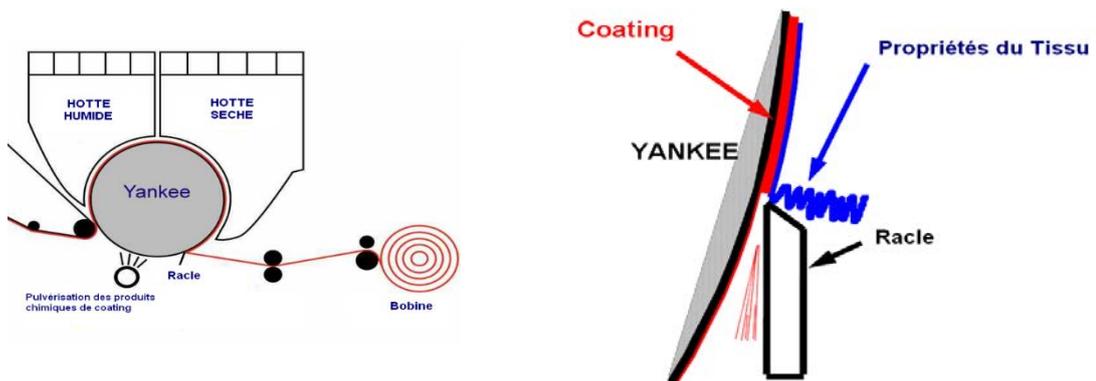


Figure 9: (a) Schématisation du procédé de séchage conventionnel, (b) Schématisation du procédé de crêpage

La lame permet aussi de générer la structure typique des crêpes. C'est cette structure qui donne au papier ses propriétés de douceur, d'épaisseur, d'allongement... Par exemple, un crêpage fin donnera de la douceur et un crêpage plus grossier donnera du volume à la feuille de papier. Un exemple de crêpage est présenté en Figure 10. De nombreux paramètres influent sur la qualité du crêpage tels que : l'adhésif entre le yankee et le papier, l'angle formé entre la lame et le cylindre, la vitesse de rotation du cylindre par rapport à la vitesse de la bobineuse, l'usure du racle ou encore la pression exercée par le racle [66].

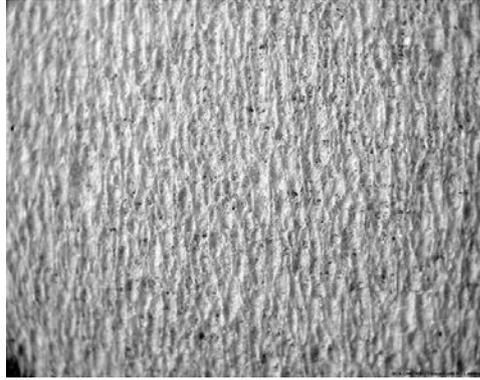


Figure 10 : Feuille de papier formée à partir d'un procédé CWP, vue de dessus au MEB

Contrairement au CWP, pour le procédé TAD, la feuille de papier n'est jamais comprimée pour enlever l'eau. Elle est séchée directement sur la toile par soufflage d'air très chaud (supérieur à 350°C) à travers la feuille. Le séchage est ensuite finalisé par le yankee sécheur. Ce procédé permet d'avoir des papiers avec plus de volume, la feuille de papier prend la forme de la toile sur laquelle elle était posée (Figure 11).



Figure 11 : Feuille de papier issue du procédé TAD, vue de dessus au MEB

En conclusion, à partir d'une pâte à papier, on peut créer une multitude de feuilles de papier avec des propriétés différentes.

2.2.2.2. De la feuille de papier au produit fini

Dans ce travail, on s'intéresse aux produits à usage sanitaire type papier toilette et mouchoir en papier. Ces produits finis sont fabriqués à partir de feuilles de papier de la bobine mère, on parle de feuilles de base. En raison de leurs faibles grammages, ou masses surfaciques (jusqu'à 12 g/m²), le produit fini est composé de l'assemblage de plusieurs feuilles de base, plusieurs plis. L'étape de transformation de la bobine mère en produits finis consiste alors à gaufrer, imprimer et coller les plis ensemble. Cette étape influe sur les propriétés du produit fini. En particulier, le gaufrage a un impact sur la douceur. De plus, les feuilles de base utilisées pour les différents plis du produit fini peuvent être issues de différents procédés de fabrication afin d'obtenir des propriétés spécifiques pour le produit fini. Par exemple pour un papier hygiénique, il est possible d'utiliser trois plis avec à l'extérieur des feuilles de bases douces et à l'intérieur une feuille de base résistante pour obtenir un produit fini à la fois doux en surface et résistant.

En conclusion, cette étape joue un rôle essentiel dans la définition des propriétés du produit fini que ce soit en termes de douceur, de résistance ou d'absorption.

2.2.3. Définition de la qualité tactile d'un papier en cellulose

La qualité tactile d'un papier en cellulose est une combinaison de trois propriétés essentielles qui sont sa résistance, son épaisseur (ou bouffant) et sa douceur. Ces trois propriétés optimisées doivent apporter un confort optimal pour l'utilisateur. Le seul moyen pour augmenter à la fois toutes ces propriétés est d'augmenter le coût de fabrication. Sinon, si on améliore une propriété, une autre va diminuer. Par exemple, si on augmente la douceur on va perdre en résistance.

La qualité tactile recherchée est différente selon les préférences de chacun et particulièrement en fonction des régions du monde. Ainsi, en Amérique, on recherchera la douceur au détriment de la résistance du papier. Au contraire, le marché allemand, et est-européen de manière générale, est plus tourné vers des produits très résistants et plus épais [67], [68].

2.2.4. Conclusion

Les papiers cellulosiques sont constitués d'une multitude de fibres de cellulose entremêlées. Ces fibres de cellulose sont extraites du bois pour former une pâte à papier qui va ensuite être transformée en feuille de base puis en produit fini en assemblant plusieurs feuilles de base (ou plis).

La qualité tactile du produit fini dépend à la fois de la composition en fibres et additifs (assouplissant, lotions...) mais aussi des étapes du processus de fabrication. D'un côté, l'origine de la fibre (fibres vierges ou recyclées, pays d'origine du bois, type de bois) a un impact direct sur les propriétés finales du papier. D'un autre côté, à partir d'une même fibre de cellulose il est possible de fabriquer une multitude de produits finis avec des propriétés tactiles différentes. En effet, le procédé de fabrication de la pâte à papier, le type de machines à papier (TAD, CWP), le crêpage, la transformation de la feuille de base en produit fini et en particulier le gaufrage sont autant d'étapes qui influent sur la qualité finale du papier.

2.3. Evaluation de la qualité sensorielle

2.3.1. La perception tactile

La perception tactile permet de ressentir les textures, les reliefs ou encore la rigidité d'un objet, d'une surface. On distingue deux formes différentes d'exploration tactile : le toucher passif et le toucher actif [69], [70]. Le toucher passif ou perception cutanée est obtenu par une stimulation de la peau, sans mouvement de la personne. C'est par exemple le cas lorsque le dos de la main repose sur une table et qu'une pointe est déplacée sur la paume. Au contraire, le toucher actif résulte de la stimulation de la peau issue des mouvements actifs de la personne, le plus souvent des mouvements de la main. Dans ce cas, les récepteurs sensoriels profonds situés dans les tendons, les articulations et les muscles sont excités en même temps que les récepteurs cutanés de la peau (mécanorécepteurs). On parle alors de perception tactilo-kinesthésique ou haptique (terme introduit en psychologie par Revesz en 1950 [71]) pour souligner la participation de la proprioception (perception de la position des différentes parties du corps) à ce processus. Plus encore que dans les autres modalités sensorielles, les perceptions tactiles sont bien plus riches et fines lorsque des mouvements d'exploration sont effectués par les organes sensoriels que lorsqu'il s'agit de perception passive. En effet, ces mouvements permettent d'augmenter la taille du champ perceptif tactile, qui est toujours limité à la zone de contact.

Lederman et Klatzky sont parmi les premiers à avoir étudié la perception haptique [72]. Elles ont observé et caractérisé une série de procédures exploratoires pour recueillir de l'information tactile telles que le mouvement latéral pour la perception de textures et la pression pour la perception de la dureté. Johnson et Lamb, en 1981, ont montré que le mouvement latéral de la main augmentait la réponse des cellules de Merkel, récepteurs cutanés impliqués dans la perception de rugosité des macrotectures [73]. Des vibrations sont engendrées lors du mouvement latéral de la main [74]. Ces vibrations activent les corpuscules de Pacini qui sont considérés comme les récepteurs impliqués dans

la perception de rugosité des microtextures [75]. Récemment, Yoshioka *et al.* [76] ont montré que le système kinesthésique avait aussi un rôle dans la perception de textures. Ainsi, la plupart des études concernant la perception de textures ont été réalisées sur de petits échantillons afin de limiter l'effet du système kinesthésique en contraignant le mouvement de la main sur la surface.

2.3.2. Evaluation de la perception tactile dans la littérature

2.3.2.1. Perception tactile des textiles

L'industrie du textile s'est depuis longtemps attelée à la caractérisation de la perception tactile de ses produits. Deux types de méthodes sont utilisées pour évaluer la qualité tactile d'un textile : une méthode subjective et une méthode plus objective.

La méthode subjective par excellence consiste à demander à un panel humain entraîné de noter un certain nombre de textiles en fonction de différents critères. Les volontaires sont invités à frotter la surface textile avec le doigt et à donner leur ressenti tactile. Pour cela, ils utilisent des mots descriptifs pour classer les textiles tels que : lisse/rugueux, chaud/froid, mou/dur, doux/pas doux, plaisant/désagréable, collant/non collant [77]–[80]. Pour Bolanowski *et al.*, trois dimensions suffisent pour décrire la qualité tactile d'un textile : la rugosité, la dureté et une dimension aléatoire [79]. Bergmann *et al.* ont trouvé qu'au minimum quatre critères étaient nécessaires pour décrire correctement la surface du textile [77]. D'après ces chercheurs, chaque critère n'est pas forcément corrélé à une propriété de surface. Malgré la fiabilité des panels humains pour évaluer la qualité des textiles, ces méthodes sont très coûteuses et chronophages. De plus, cette évaluation subjective est influencée par de nombreux facteurs tels que la sensibilité de chacun, mais aussi les propriétés physico-chimiques du doigt qui varient selon l'âge, le genre et le taux d'hydratation de la peau [81], [82].

Ainsi, diverses tentatives ont visé à utiliser des instruments capables d'évaluer quantitativement la qualité tactile d'un textile. Le traitement informatique d'images est généralement utilisé dans le secteur du textile. Il permet d'obtenir des données concernant l'espacement entre les fils et le contenu en fibres (types de fibres, longues, courtes...) [83]–[85]. Cependant, cette méthode ne permet pas d'avoir accès à certaines propriétés de surface telles que la douceur et la rugosité. Ainsi, les scientifiques ont essayé de corréler des paramètres physiques du textile à certaines de ses propriétés tactiles. Kawabata et Niwa ont développé un système mécanique, le KES-F (Kawabata Evaluation System for Fabric), pour évaluer les sensations tactiles de textiles [86]. D'autres appareils mécaniques comme le FAST (Fabric Assurance for Simple Test) ont ensuite été développés dans le but d'obtenir des informations tactiles par un test mécanique simple et rapide. Bacci *et al.* ont montré que les mesures obtenues avec le FAST pouvaient être corrélées avec la perception tactile pour des textiles type laine. En particulier, ils ont trouvé une corrélation avec la douceur, la résistance et la souplesse perçues par le panel sensoriel [87]. D'autres scientifiques se sont intéressés à la corrélation entre le frottement et les sensations tactiles perçues par un panel sensoriel [88], [89]. Ramalho *et al.* ont mesuré le coefficient de frottement de différents textiles sur la peau avec une sonde portable. En comparant les réponses à un questionnaire sensoriel avec les coefficients de frottement mesurés, une corrélation positive a été mise en évidence pour l'aspect lisse et collant du textile [90]. D'autres approches ont consisté à fabriquer des doigts artificiels capables de mimer le comportement du doigt humain lors du toucher d'un textile [91]–[94]. En particulier, Tanaka *et al.* ont développé un capteur en PVDF (Polyvinylidène Fluoride) capable de mimer le doigt humain pour évaluer la qualité tactile de textiles. En plus de la mesure du coefficient de frottement, Chen *et al.* ont ajouté l'analyse des vibrations générées lors du mouvement du doigt artificiel sur la surface [93]. Ils ont trouvé que les vibrations étaient aussi corrélées à des propriétés tactiles du textile. De même, Fagiani *et al.* ont montré l'importance de l'analyse des vibrations pour évaluer la perception tactile d'un textile, en particulier sa rugosité [95].

2.3.2.2. Perception tactile des papiers en cellulose

Contrairement aux textiles tissés, les non-tissés tels que les papiers en cellulose ont reçu moins d'attention dans la caractérisation de leur perception tactile. Pourtant, évaluer et améliorer la qualité tactile des papiers en cellulose est une nécessité pour les industriels qui veulent sans cesse proposer le papier qui soit le plus confortable possible pour le futur utilisateur. Ils associent souvent douceur et confort à l'usage. On distingue parfois la douceur surfacique, qui comme son nom l'indique est reliée plutôt à la topographie de surface, de la douceur massique reliée au moelleux du papier. La douceur est principalement évaluée par des panels sensoriels humains. Deux méthodes sont couramment utilisées : la comparaison par paire et le classement en fonction d'une propriété tactile spécifique. Le principal problème de la méthode de classement est qu'il s'agit d'une méthode relative : on connaît la position respective des papiers les uns par rapport aux autres mais on ne quantifie pas les écarts entre deux papiers. L'utilisation de panels humains nécessite une phase d'entraînement des volontaires pour qu'ils soient en mesure de reconnaître différentes caractéristiques tactiles telles que la douceur, l'aspect duveteux ou encore le moelleux d'un papier. Cependant, l'évaluation de la qualité tactile d'un papier reste toujours problématique même avec un panel entraîné. C'est pourquoi plusieurs études ont eu pour objectif d'établir des corrélations entre la douceur évaluée par un panel et les propriétés physiques des papiers.

La plupart de ces études ont testé différents paramètres physiques et ont ensuite essayé différentes techniques de régression pour établir une relation empirique entre ces paramètres et la douceur perçue. Ainsi, la douceur massique a pu être corrélée à la compressibilité, à l'épaisseur ou à la rigidité du papier [96], [97]. La douceur surfacique a, quant à elle, été corrélée aux irrégularités de surface (rugosité) obtenues grâce à un profilomètre [98]. Plus récemment, Ampulski et Hollmark ont proposé un tour d'horizons des méthodes d'évaluation de la douceur. Ils ont conclu que la douceur de masse était reliée à la rigidité, la compression, l'allongement du papier et la douceur surfacique au coefficient de frottement et à la texture [99]. Enfin, la société Emtec a récemment développé un nouvel appareil, le TSA (Tissue Softness Analyzer) qui permet de mesurer la douceur des papiers par analyse du son généré lors du frottement d'hélices sur la surface du papier.

Si les travaux scientifiques menés ont permis d'améliorer l'évaluation ou la prédiction de la douceur des papiers en cellulose, des progrès restent à faire. C'est pourquoi, le panel sensoriel demeure la méthode d'évaluation tactile privilégiée par les industriels.

Dans ce travail, nous proposons de mimer l'action de toucher du doigt sur la surface du papier à analyser. Notre objectif est de permettre d'avoir une évaluation physique quantitative de la qualité tactile des papiers en cellulose.

2.4. Développement de dispositifs d'évaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose

2.4.1. Dispositifs d'évaluation de la douceur des papiers en cellulose

2.4.1.1. Le doigt humain instrumenté

Matériel et paramètres d'essai

Pour étudier la qualité sensorielle des papiers en cellulose de manière quantitative, une première approche a consisté à équiper le doigt humain d'un capteur sensible aux vibrations générées lors du frottement de la pulpe du doigt sur la surface à analyser. Le système utilisé dans cette thèse a été adapté d'un précédent dispositif développé au sein de l'équipe en intégrant la mesure des efforts au cours du test [100]. Le dispositif employé est représenté en Figure 12. Il permet de mesurer à la fois les efforts et les vibrations induites lors du toucher de surfaces. Les vibrations sont mesurées par un accéléromètre mono axe fixé sur le côté gauche de l'index droit. Les caractéristiques de l'accéléromètre sont les suivantes : une masse de 0,14 g, un diamètre de 3,58 mm, un gain de 1 V/m/s² et une sensibilité de 0,5 pC/m/s². Les efforts normal et tangentiel sont mesurés grâce à des capteurs

d'efforts situés sous l'échantillon à analyser. L'effort maximal mesuré peut atteindre 3 N avec une résolution de 1 mN. Chaque capteur est relié à un conditionneur qui est lui-même câblé à une carte d'acquisition National Instrument qui transmet les données à un ordinateur. Un programme implémenté sous Labview permet d'acquérir les données qui sont ensuite traitées et mises en forme sous Matlab.

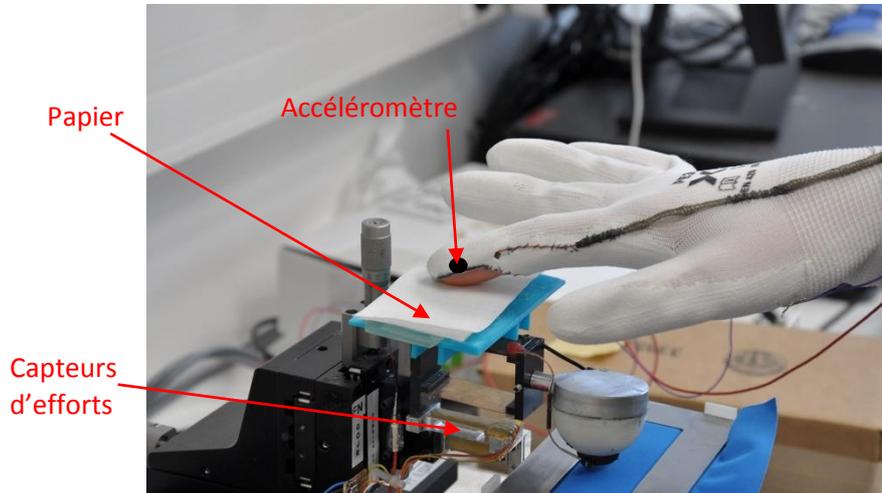


Figure 12 : Système du doigt humain instrumenté

Lors d'un essai, le papier est fixé sur un porte échantillon pour éviter qu'il ne bouge durant le test. Le doigt humain effectue 5 mouvements tangentiels unidirectionnels (de gauche à droite) sur la surface du papier. La longueur du frottement est de 20 mm. Durant le mouvement du doigt, l'effort normal est maintenu entre 0,3 et 0,4 N et la vitesse de frottement autour de 20 mm/s. Ces conditions de frottement ont été choisies pour être représentatives des conditions classiques de toucher de surfaces textiles [101], [102].

Méthode d'analyse

La Figure 13 représente un exemple de vibrations obtenues pour 5 mouvements du doigt humain sur la surface à analyser. Pour traiter ces signaux, nous réalisons un découpage du signal vibratoire pour ne garder que les signaux correspondant au contact entre la pulpe du doigt et l'échantillon. A partir du signal formé, il est possible de calculer le niveau vibratoire acoustique moyen L_a en décibels (dB), défini par :

$$L_a = 20 \log \left(\frac{A_{RMS}}{A_{ref}} \right)$$

où A_{RMS} est la valeur efficace de l'amplitude des vibrations (m^2/s) et A_{ref} est la plus petite amplitude de vibrations mesurable, $A_{ref} = 10^{-6} m/s^2$.

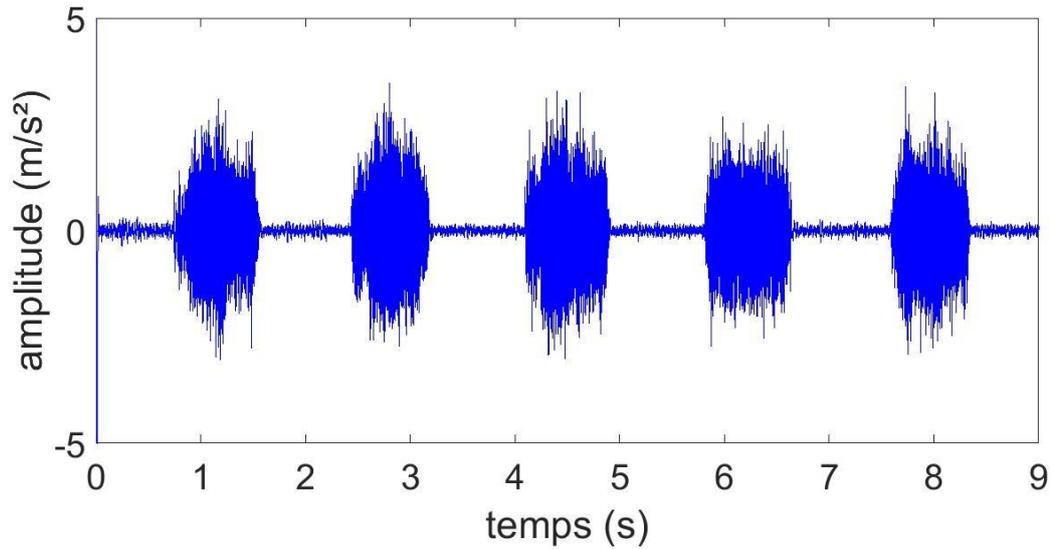


Figure 13 : Vibrations mesurées pour un sujet masculin de 26 ans

La Figure 14 représente un exemple de signaux d'efforts normal et tangentiel obtenus. Nous appliquons le même découpage temporel que pour le signal vibratoire. A partir des courbes d'efforts obtenues, nous calculons le coefficient de frottement moyen sur les 5 cycles. On définit le coefficient de frottement μ , tel que :

$$\mu = \frac{F_X}{F_Z}$$

où F_X représente l'effort tangentiel et F_Z l'effort normal appliqué.

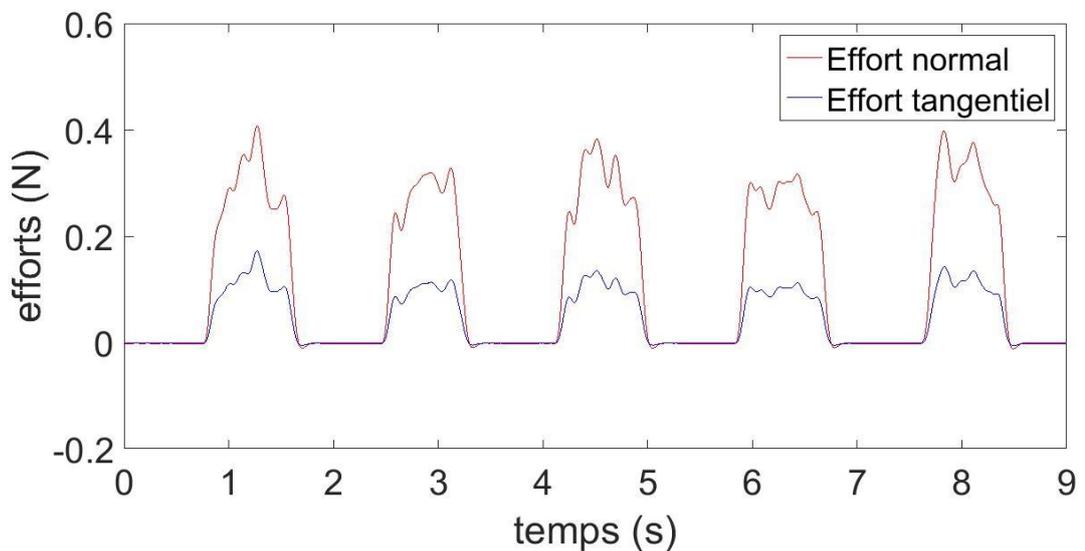


Figure 14 : Courbes expérimentales des efforts obtenus pour un sujet masculin de 26 ans

2.4.1.2. Le doigt artificiel

Matériel et paramètres d'essai

Afin d'objectiver les sensations du toucher des papiers en cellulose, une seconde approche a consisté à développer un doigt artificiel capable de mimer le comportement du doigt humain. Le

dispositif permet de reproduire le toucher tangential unidirectionnel d'un doigt sur une surface. Le dispositif du doigt artificiel est présenté Figure 15.

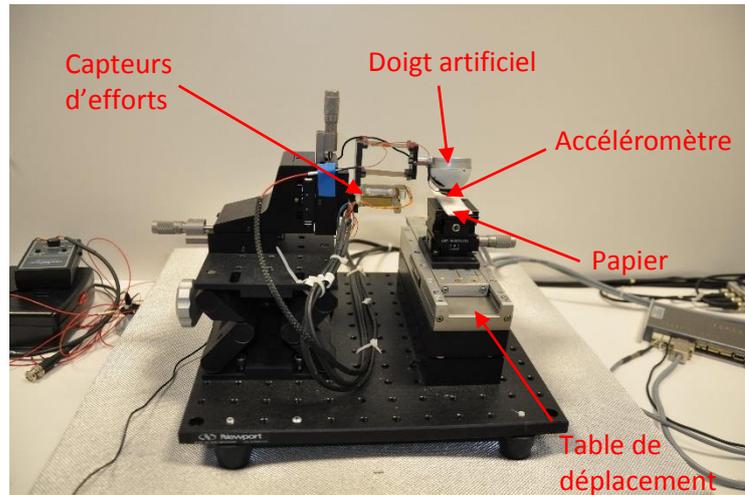


Figure 15 : Dispositif du doigt artificiel

Le doigt artificiel reste statique durant l'essai. A l'inverse, le papier étudié se déplace sous le doigt grâce à un moteur linéaire. Le test consiste à appliquer un effort normal constant avec le doigt artificiel sur la surface du papier et à effectuer 5 allers-retours de la surface sous le doigt. Des jauges de contraintes, situées sur la partie statique du dispositif, permettent de contrôler l'effort normal appliqué et de mesurer les efforts normal et tangential durant l'essai. Il s'agit des mêmes capteurs d'effort utilisés pour le doigt humain instrumenté. Les vibrations générées durant le frottement sont enregistrées par un accéléromètre ayant les mêmes caractéristiques que l'accéléromètre du doigt humain instrumenté. Chaque capteur est relié à un conditionneur qui est lui-même câblé à une carte d'acquisition National Instrument qui transmet les données à un ordinateur. Un programme implémenté sur Labview permet d'acquérir les données qui sont ensuite traitées et mises en forme sous Matlab.

Durant le test, le papier est fixé sur la table de déplacement de manière à ne pas bouger. La longueur de frottement est fixée à 20 mm, l'effort normal à 0,3 N et la vitesse à 20 mm/s pour se rapprocher des conditions réelles de toucher de papiers [101], [102].

Méthode d'analyse

La Figure 16 représente un exemple de vibrations obtenues pour 5 allers-retours du doigt artificiel sur un papier en cellulose. Comme pour le doigt humain instrumenté, nous réalisons un découpage pour ne conserver que les signaux vibratoires correspondant aux signaux « allers ». A partir du signal formé, nous calculons le niveau vibratoire acoustique moyen L_a .

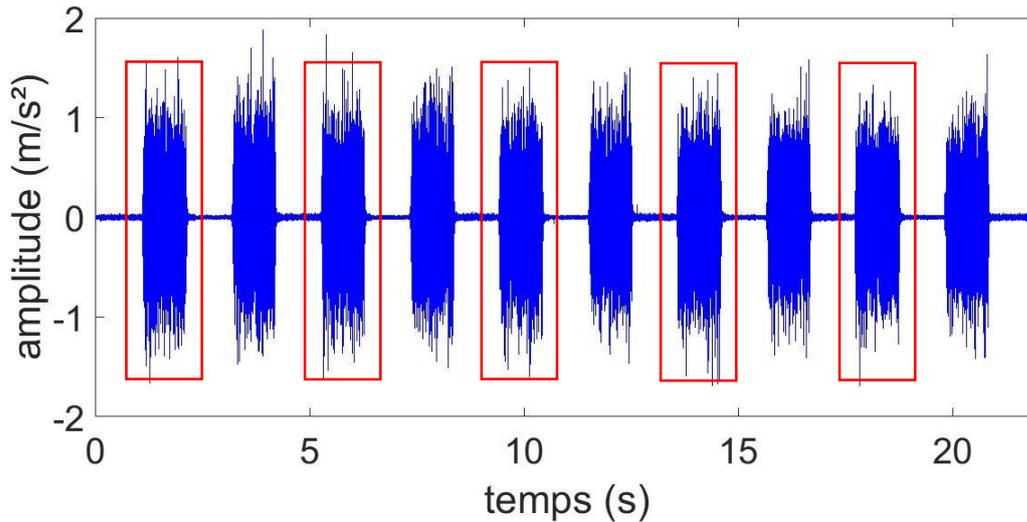


Figure 16 : Vibrations enregistrées avec le doigt artificiel pour 5 allers-retours. Les signaux « allers » sont encadrés en rouge.

La Figure 17 représente un exemple de signaux d'efforts normal et tangentiel mesurés avec le doigt artificiel. Contrairement aux signaux d'efforts obtenus avec le doigt humain instrumenté, nous remarquons que le signal d'effort normal reste constant au cours du test. Cela est dû au fait que le doigt artificiel reste constamment en contact avec la surface à analyser. Quant à l'effort tangentiel, il alterne avec une valeur positive lors du mouvement « aller » et une valeur négative lors du mouvement « retour ». Nous réalisons le même découpage temporel que pour les vibrations et à partir des signaux formés, nous calculons le coefficient de frottement moyen μ .

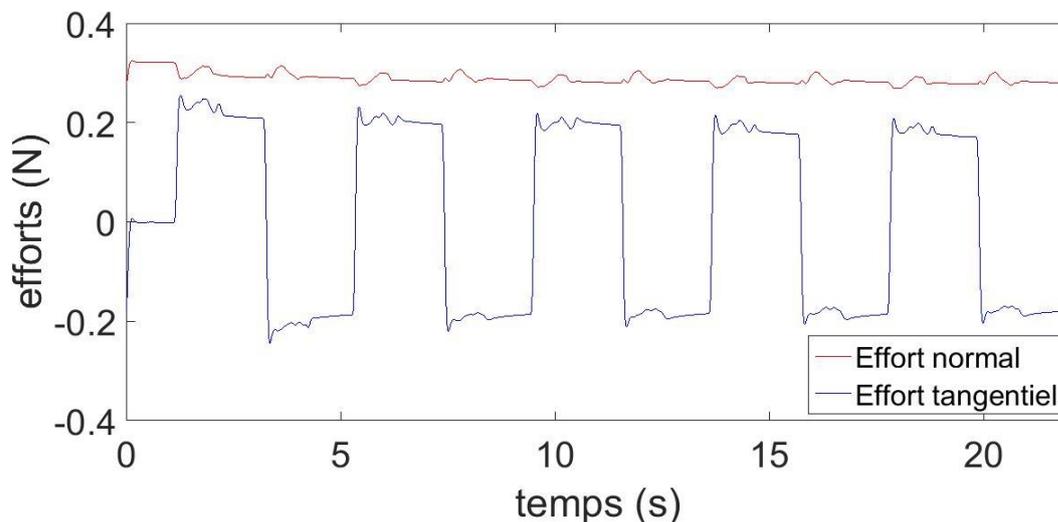


Figure 17 : Efforts normal (en rouge) et tangentiel (en bleu) mesurés lors d'un test avec le doigt artificiel

2.4.2. Dispositif d'analyse de la surface des papiers en cellulose

2.4.2.1. Le microscope confocal

La microscopie confocale est une technique optique qui a la propriété de réaliser des images de très faible profondeur de champs (zone de netteté de l'image) appelées sections optiques. En positionnant le plan focal de l'objectif à différentes profondeurs dans l'échantillon, il est possible de

réaliser une succession d'images à partir desquelles on obtient une représentation tridimensionnelle de l'objet.

Le principe de fonctionnement du microscope confocal est présenté en Figure 18. Un faisceau incident de lumière blanche est envoyé sur un séparateur de faisceau qui décompose la lumière blanche en ses différentes longueurs d'onde qui sont ensuite focalisées par une lentille chromatique. Lorsqu'un objet est présent dans la zone éclairée, une seule longueur d'onde est parfaitement focalisée sur sa surface et ensuite réfléchi au niveau du système optique. Cette lumière réfléchie passe à travers un sténopé (ou diaphragme de détection) jusqu'à un spectromètre. Ce dernier va analyser quelle longueur d'onde est parfaitement focalisée sur la surface de l'objet, donnant ainsi l'altitude du point de la surface mesurée.

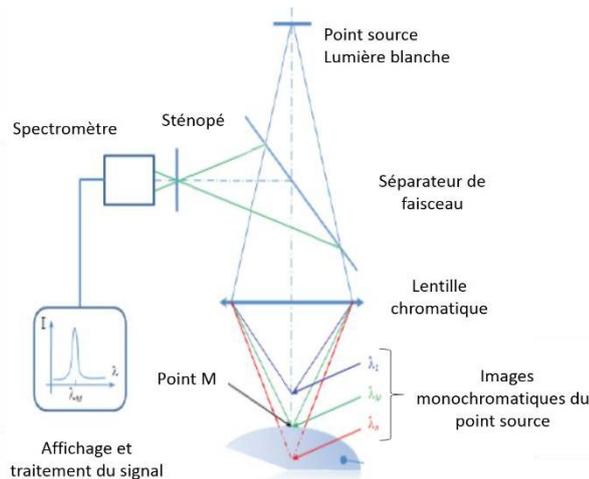


Figure 18 : Principe de fonctionnement du microscope confocal

Le système utilisé pour cette étude comprend le contrôleur CHR150L de la société STIL et la sonde STIL pouvant mesurer des altitudes inférieures à 400 μm . Cette sonde a été choisie car nous souhaitons pouvoir observer l'état de surface à l'échelle des petites rugosités du papier en cellulose (fibres et crêpage). La résolution latérale des images obtenues est de 10 μm et la résolution verticale de 80 μm . Les mesures topographiques obtenues sont ensuite traitées avec le logiciel TopoSurf. Les images finales, utilisées dans cette étude, ont une taille de 2,55 mm \times 2,55 mm (256 pixels \times 256 pixels).

2.4.2.2. L'analyse en ondelettes

L'analyse en ondelettes s'est développée au cours du XX^{ème} siècle en s'inspirant de l'analyse de Fourier. La transformée de Fourier permet de décomposer un signal donné en la somme de chacune de ses composantes fréquentielles. Cependant, cette transformée ne permet pas de localiser les variations du signal dans l'espace physique. Le point de vue des ondelettes permet de définir une représentation des signaux qui soit précise à la fois dans l'espace des fréquences, mais également dans l'espace physique. L'analyse en ondelettes est un outil particulièrement efficace pour parvenir à une caractérisation multi-échelle de la topographie d'une surface. En effet, en 2005, Mezghani [103] a développé une méthode basée sur la transformation en ondelettes et la formule de reconstruction qui permet de décomposer la rugosité en la somme de contributions à différentes échelles.

De la même façon qu'un prisme de Newton décompose la lumière blanche en ses différentes composantes spectrales, la transformation en ondelettes 1D permet de décomposer un signal 2D sur toutes ses échelles allant de la petite rugosité à la forme (Figure 19).

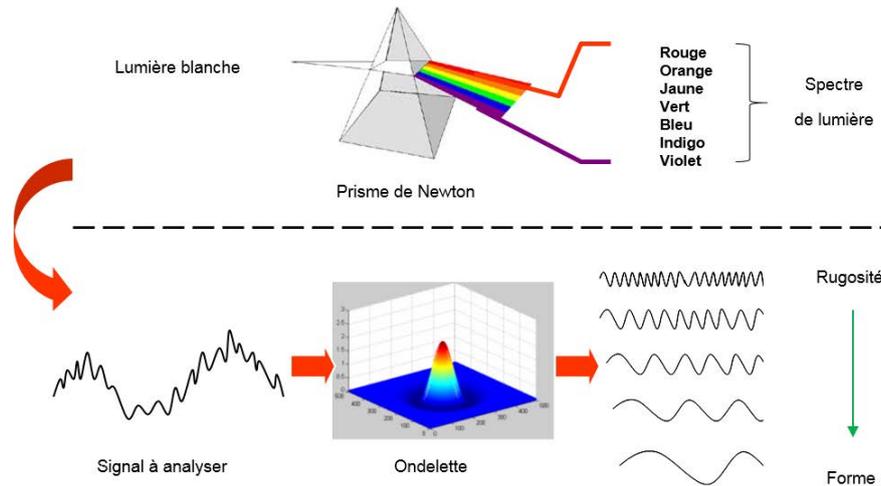


Figure 19 : Décomposition multi-échelle par ondelettes

Le principe de l'analyse en ondelettes est basé sur l'utilisation de fenêtres d'analyse de tailles variables, ce qui permet de réaliser une étude multi-résolution des données de la surface et de quantifier localement les différentes composantes fréquentielles de l'image topographique de cette surface [103], [104]. Dans le cas d'une résolution grossière, les données sont traitées à l'aide d'ondelettes larges et avec un petit nombre de coefficients. Par contre, à une grande résolution, on utilise un grand nombre de petites ondelettes qui permettent une analyse plus fine. Par analogie, l'analyse en ondelettes est équivalente à l'observation par un microscope optique, dont les grossissements des objectifs sont les ondelettes analysantes à différentes largeurs ou échelles. La compression des ondelettes analysantes augmente le grossissement du microscope numérique et permet d'observer des détails de plus en plus fins. Les différentes résolutions sont générées par une seule fonction ondelette de base, appelée ondelette mère $\psi(x, y)$, qui va subir des dilatations (ou contractions) « a » et translations « b ». Par rapport à une analyse de Fourier, l'analyse en ondelettes a une meilleure résolution locale dans le domaine des hautes fréquences, grâce aux propriétés de contraction des ondelettes et l'échantillonnage des longueurs d'onde dans une échelle dyadique. Dans le domaine temporel, cette analyse sera représentée dans un diagramme temps-fréquences.

Mathématiquement, il s'agit d'une convolution du signal à traiter par une famille d'ondelettes. On définit les ondelettes 2D, $\psi_{a,b}(x, y)$, par la dilatation (ou contraction) et la translation de l'ondelette mère $\psi(x, y)$ tel que :

$$\psi_{a,b}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{a_x a_y}} \psi\left(\frac{x - b_x}{a_x}, \frac{y - b_y}{a_y}\right)$$

avec a_x, a_y, b_x, b_y les paramètres de dilatation et de translation dans les directions x et y.

La transformée en ondelette continue d'un signal $f(x, y)$ est définie comme :

$$W_{\psi}^f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a_x a_y}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \psi^*\left(\frac{x - b_x}{a_x}, \frac{y - b_y}{a_y}\right) dx dy$$

Les ondelettes sont donc de forme constante, mais de taille variable, proportionnelle au paramètre d'échelle « a » variant sur toute l'étendue du signal. La taille variable des ondelettes permet de localiser les informations spatiales locales du signal de rugosités en fonction de l'échelle d'analyse « a ».

A partir de l'ensemble des coefficients calculés, il est possible de reconstituer la surface de départ $f(x, y)$. Pour cela, on applique la transformée inverse en ondelettes continues 2D. L'expression du signal à reconstituer devient :

$$f(x, y) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_\psi^f(a, b) \psi_{a,b}(x, y) \frac{da^2 db^2}{a^2}$$

Avec C_ψ une constante qui dépend de l'ondelette mère.

Le signal reconstruit permet ainsi de localiser avec une grande précision et sans perte d'information les différentes composantes du signal.

Un des points importants de la décomposition en ondelettes continues réside dans la grande résolution des ondelettes pour étudier les échelles du signal analysé dans toutes les bandes de longueur d'onde. Cette propriété permet de quantifier le paramètre SM_a pour chaque échelle d'analyse « a », allant de la petite rugosité aux grandes ondulations (forme). Ce paramètre de rugosité représente la valeur moyenne de l'amplitude du signal à une échelle (ou longueur d'onde) donnée. Le résultat est représenté sous la forme d'un spectre du critère de rugosité SM_a des petites aux grandes longueurs d'onde. Ce spectre constitue une signature multi-échelle de la surface, sans se limiter à une bande de longueurs d'onde données.

Dans notre étude, les surfaces des papiers en cellulose obtenues par microscopie confocale ont été décomposées en 32 échelles différentes, c'est-à-dire en 32 bandes de longueurs d'onde allant de 0,13 à 30 μm selon une progression logarithmique. L'ondelette mère utilisée est l'ondelette dite « chapeau mexicain 2D » (dérivée seconde d'une gaussienne). Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\psi(x, y) = (2 - r)e^{-\frac{r}{2}} \text{ avec } r = x^2 + y^2$$

La décomposition en ondelettes des surfaces a été réalisée avec le logiciel Topolab.

2.5. Préparation des échantillons

2.5.1. Echantillons de papiers en cellulose utilisés pour l'étude

Pour limiter le nombre de paramètres influant sur la douceur du papier, nous nous sommes limités à l'étude des feuilles de base cellulosiques servant à fabriquer les produits finis tels que le papier hygiénique, les mouchoirs en papier ou l'essuie-tout. De plus, seules des feuilles de base issues du procédé conventionnel de fabrication (et non TAD) ont été étudiées.

Six feuilles de base ont été sélectionnées en fonction de leurs douceurs évaluées entre 1,5 et 4,0 sur une échelle propre à la société SCA. La note 1,5 se réfère au papier le moins doux et la note 4,0 au papier le plus doux. L'évaluation de la douceur a été réalisée par un panel humain composé de trente volontaires entraînés, incluant treize femmes et dix-sept hommes âgés de 25 à 55 ans.

L'objectif était d'avoir une évaluation subjective de la douceur des papiers qui puisse ensuite être comparée aux paramètres expérimentaux obtenus avec les dispositifs développés pendant la thèse.

Dans toute l'étude, les échantillons sont nommés « BS » (pour « basesheet » ou « feuille de base » en français) suivi de la note douceur attribuée par le panel. Par exemple, la feuille de base la moins douce (ayant la note 1,5) sera nommée BS1,5.

Le Tableau 1 présente les caractéristiques physiques des feuilles de base de l'étude. Les mesures ont été réalisées au sein de la société SCA selon les méthodes standards ISO de l'industrie papetière (EN 12625-4 pour la résistance à la traction et l'étirement à sec, EN 12625-6 pour le grammage et EN 12625-3 pour l'épaisseur). Le grammage correspond à la masse surfacique du papier exprimée en g/m^2 . La résistance à la traction à sec correspond au maximum de contrainte pour laquelle la feuille de papier se déchire, elle s'exprime en N/m . L'étirement à sec représente le ratio de

l'élongation d'une feuille sur sa longueur initiale, au moment où la force de traction maximale est atteinte. Il s'exprime en pourcentage. Enfin, la composition fibreuse donne la proportion de fibres provenant de bois résineux et feuillus. Elle nous indique également le pourcentage de fibres recyclées utilisées pour la fabrication du papier.

Au cours de la fabrication du papier, les fibres s'orientent préférentiellement dans le sens marche (sens MD pour « machine direction »). Cette orientation fibreuse est à l'origine d'une anisotropie des caractéristiques du papier. Ainsi, la résistance à la traction et l'étirement sont différents suivant le sens de la feuille (MD ou CD).

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des feuilles de base de l'étude

Référence	Grammage (g/m ²)	Epaisseur (mm)	Résistance à la traction à sec (N/m)		Etirement à sec (%)		Composition fibreuse (%)		
			MD	CD	MD	CD	Résineux	Feuillu	Fibres recyclées
BS1,5	18,7	0,13	364	256	21,1	4,7	60	40	0-20%
BS2,0	18,4	0,14	222	118	24,3	5,4	68	32	0-20%
BS2,5	20,1	0,17	108	52	22,2	4,4	42	58	0-20%
BS3,0	20,7	0,16	111	44	22,8	4,7	37	63	0-20%
BS3,5	20,1	0,13	92	29	14,8	3,8	35	65	0-20%
BS4,0	14,7	0,12	54	20	13,1	3,7	33	67	0-20%

Grâce au Tableau 1, nous remarquons d'ores et déjà que la composition fibreuse du papier a un réel impact sur sa douceur et sa résistance à la traction. En effet, les papiers BS1,5 et BS2,0 qui contiennent plus de fibres provenant de résineux (fibres longues), ont une meilleure résistance à la traction. Par contre, ils ne sont pas jugés très doux par le panel humain. Au contraire, les papiers contenant plus de fibres issues de feuillus (fibres courtes) sont jugés plus doux et sont moins résistants à la traction.

2.5.2. Protocole de toucher des papiers en cellulose

Les feuilles de base cellulosiques testées se présentent sous la forme de feuilles rectangulaires. Lors de la fabrication des produits finis, les feuilles de base sont assemblées entre-elles pour former plusieurs plis. La face du dessous des feuilles de base se retrouvent alors au centre dans le produit fini. C'est pourquoi dans cette étude, seule la face du dessus est testée car c'est elle qui donnera la douceur au produit fini.

Pour les mesures expérimentales, les papiers ont été découpés en rectangle de 7 × 10 cm², le plus grand côté correspondant au sens marche de la machine. Ils ont ensuite été conservés dans une salle contrôlée en température (23°C) et en taux d'humidité (55%). Les tests ont ensuite été réalisés dans cette même pièce.

Nous avons vu que le papier avait des propriétés anisotropes en raison de l'orientation de ses fibres. Il est donc raisonnable de penser que la douceur est différente suivant le sens du toucher du papier. Dans notre étude, nous nous limitons au toucher dans le sens marche qui correspond au sens de toucher couramment utilisé par les consommateurs.

2.6. Résultats

Les résultats de cette étude ont subi diverses analyses statistiques que nous présentons ci-dessous.

Pour analyser la capacité du niveau acoustique et du coefficient de frottement à discriminer les papiers en cellulose selon leur douceur, nous avons réalisé une analyse de la variance (ANOVA) des données. L'ANOVA est un test statistique paramétrique (pour des distributions normales de données) qui permet de déterminer si des groupes de données ont une distribution significativement différente les unes par rapport aux autres. Dans ce test, on ne peut conclure à l'existence d'une différence que si le risque de commettre une erreur est faible. En général, on considère comme faible un risque d'erreur α de 5%. Ainsi, c'est le calcul de la probabilité p (ou valeur p) qui permet de conclure sur l'existence d'une différence significative ou seulement due au hasard. En pratique, si p est inférieure à 0,05 on considère la différence significative au seuil de 5% (niveau de confiance de 95%). Les données sont représentées sous la forme de box plot (ou diagramme en boîtes).

Pour étudier le bio mimétisme du doigt artificiel, nous avons effectué un test de corrélation de Spearman entre les données du doigt humain instrumenté et celles du doigt artificiel. Le test de Spearman est un test non-paramétrique qui permet de qualifier la dépendance qu'il existe entre deux variables grâce au calcul d'un coefficient de corrélation. Ce coefficient est compris entre -1 (corrélacion négative) et 1 (corrélacion positive). La corrélation entre les deux variables est d'autant plus forte que la valeur absolue du coefficient de Spearman se rapproche de 1.

2.6.1. Evaluation de la douceur des papiers en cellulose

2.6.1.1. Evaluation avec le doigt humain instrumenté

Dix volontaires droitiers, hommes et femmes âgés de 25 à 55 ans, ont participé à cette étude. Le but étant d'évaluer la douceur des papiers, l'influence de l'âge et du genre de chaque volontaire n'a pas été pris en compte.

Pour chaque papier, trois tests de toucher sont réalisés par le volontaire. Les paramètres de toucher sont récapitulés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres d'essai pour le doigt humain instrumenté

Nombre d'essais par échantillon	Vitesse de toucher (mm/s)	Force normale appliquée (N)	Longueur de frottement (mm)	Nombre de passage du doigt par essai
3	20	0,3-0,4	20	5

Niveau acoustique moyen

La Figure 20 présente les valeurs des niveaux acoustiques moyens mesurés pour les six feuilles de base cellulosiques avec le doigt humain instrumenté. Le graphique représente les box plot des données obtenues pour les dix volontaires pour chaque échantillon. La médiane est représentée en rouge, les premier et troisième quartiles correspondent aux limites bleues de la boîte et les valeurs minimale et maximale sont en noires.

Globalement, on remarque que le niveau acoustique moyen diminue avec la douceur du papier en cellulose et ceci de manière significative avec une valeur de p largement inférieure à 0,05 ($p=10^{-9}$). Cette tendance est visible pour l'ensemble des volontaires, quels que soit leurs âge et genre. Pour une douceur panel allant de 1,5 à 4,0 (du moins doux au plus doux), le niveau acoustique moyen diminue de 152,3 dB à 149,6 dB. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Zahouani *et al.* [105] qui a montré que le niveau sonore de la peau lors d'un frottement était caractéristique de sa douceur.

Ainsi, le niveau acoustique mesuré avec le doigt humain instrumenté apparaît comme un bon marqueur de la douceur des papiers en cellulose : plus il est élevé moins le papier est perçu doux par le panel. Toutefois, on remarque que l'étendue des valeurs peut être assez importante pour certains papiers, notamment la BS2,5 et la BS3,5. Ceci peut être attribué aux caractéristiques individuelles de chaque volontaire telles que la quantité de sébum à la surface du doigt, l'âge et le genre [53], [81], [106].

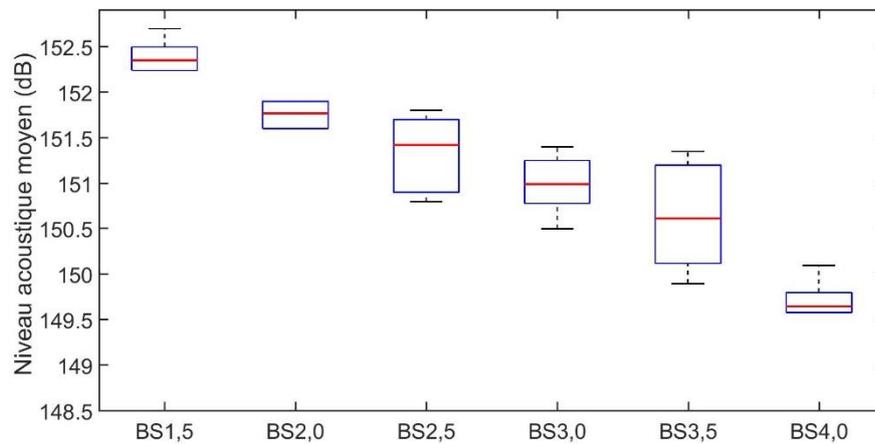


Figure 20 : Niveau acoustique moyen pour chaque feuille de base cellulosique étudiée, pour l'ensemble du panel

Coefficient de frottement

La Figure 21 présente les valeurs des coefficients de frottement mesurés pour les six feuilles de base cellulosiques. Comme pour les niveaux acoustiques, le graphique représente les box plot des données obtenues pour les dix volontaires pour chaque échantillon. On remarque qu'il n'y a aucune relation évidente entre la douceur et le coefficient de frottement obtenu pour les six échantillons de papier. Cependant, les coefficients de frottement obtenus sont significativement différents pour chaque feuille de base ($p < 0.05$). Ainsi, le coefficient de frottement permet bien de différencier les papiers entre eux mais ne retranscrit pas leur douceur.

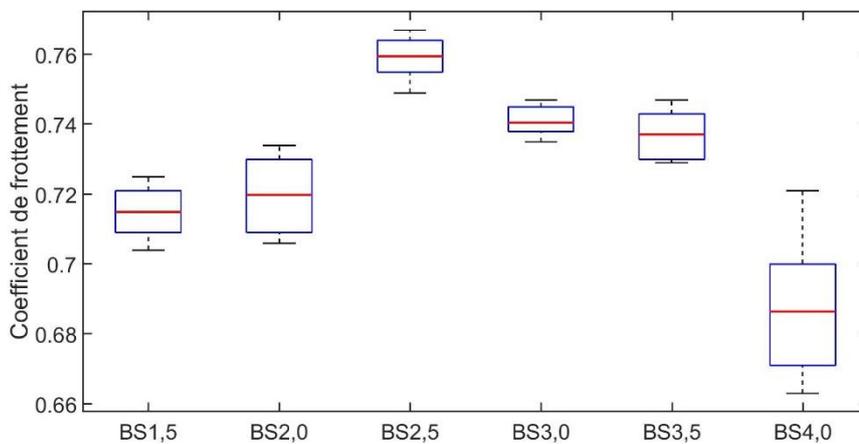


Figure 21 : Coefficient de frottement pour chaque feuille de base étudiée, pour l'ensemble du panel

Conclusion sur l'étude de la douceur avec le doigt humain instrumenté

Le dispositif du doigt humain instrumenté nous a permis de quantifier le coefficient de frottement et le niveau acoustique moyen généré lors du frottement de la pulpe d'un doigt sur la surface du papier à analyser. Les mesures réalisées sur un panel de dix volontaires nous ont permis de mettre en évidence la capacité du dispositif à discriminer les échantillons de papier. En particulier, nous avons montré que le niveau acoustique moyen était fortement corrélé négativement à la douceur panel. En effet, plus le niveau acoustique moyen a une valeur élevée, plus le papier est perçu comme n'étant pas doux. Nous avons également montré que le coefficient de frottement était différent pour chaque feuille de base mais qu'il n'avait aucun lien avec la douceur.

Ainsi, le doigt humain instrumenté est un outil performant pour l'évaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose. Néanmoins, les différences existantes entre les doigts de différents volontaires engendrent un écart-type sur les mesures qui peut être plus ou moins important. C'est pourquoi il a été intéressant de développer le doigt artificiel qui permet de s'affranchir de ces contraintes liées aux caractéristiques individuelles des volontaires.

2.6.1.2. Evaluation avec le doigt artificiel

Pour chaque papier, trois tests de toucher sont réalisés avec le doigt artificiel. Les paramètres de toucher sont récapitulés dans le Tableau 3. Les paramètres choisis sont identiques à ceux de l'étude avec le doigt humain instrumenté de manière à pouvoir comparer les résultats obtenus avec les deux dispositifs.

Tableau 3 : Paramètres d'essai pour l'étude avec le doigt artificiel

Nombre d'essais par échantillon	Vitesse de toucher (mm/s)	Force normale appliquée (N)	Longueur de frottement (mm)	Nombre de passage du doigt par essai
3	20	0,3	20	5 allers-retours

Niveau acoustique moyen

La Figure 22 présente les valeurs des niveaux acoustiques moyens mesurés avec le doigt artificiel pour les six feuilles de base cellulosiques. Tout comme pour le doigt humain instrumenté, on observe une diminution significative du niveau acoustique moyen en fonction de la note de douceur attribuée aux papiers ($p < 0,05$). Pour une douceur panel allant de 1,5 à 4,0 (du moins doux au plus doux), le niveau acoustique moyen diminue de 145,4 dB à 141,7 dB. Si on compare avec les valeurs obtenues avec le doigt humain instrumenté, on observe que les niveaux acoustiques mesurés avec le doigt artificiel sont environ 5% moins élevés. Cette différence est certainement due à la différence de rugosité entre le doigt humain réel et le revêtement du doigt artificiel. Cette différence n'est cependant pas gênante dans le sens où ce qui nous intéresse est d'avoir une méthode quantitative pour pouvoir classer les papiers selon leur douceur.

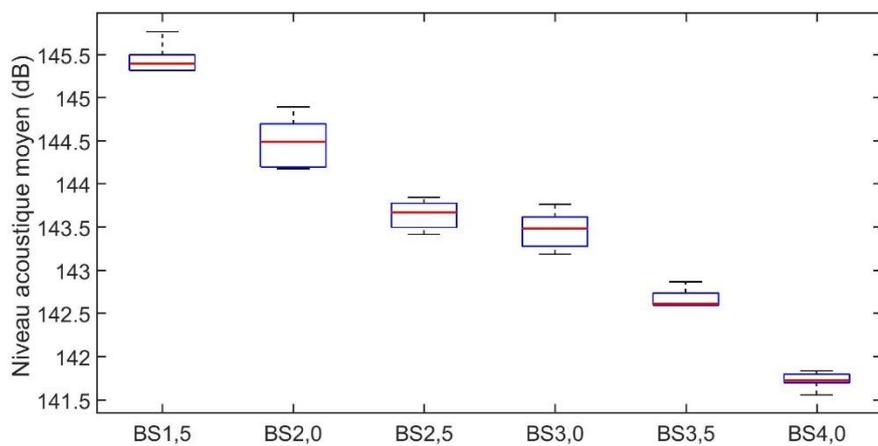


Figure 22 : Niveau acoustique moyen mesuré avec le doigt artificiel pour les six feuilles de base cellulosiques

Coefficient de frottement

La Figure 23 présente les valeurs des coefficients de frottement mesurés avec le doigt artificiel pour les six feuilles de base cellulosiques. Le constat est le même que pour le doigt humain instrumenté, le coefficient de frottement n'est pas corrélé à la douceur des papiers en cellulose. Cependant, contrairement aux mesures du doigt humain instrumenté, les coefficients de frottement mesurés présentent un écart-type beaucoup moins important. La discrimination semble donc meilleure avec le doigt artificiel qui est plus répétable.

On remarque également que les coefficients de frottement mesurés avec le doigt artificiel sont moins élevés. Il est communément admis que la force de frottement admet deux composantes : un terme de déformation et un terme d'adhésion entre les deux surfaces [107]. Dans le cas de la peau, le terme de déformation est négligeable devant le terme d'adhésion [108]. Ainsi, la présence plus ou moins importante de sébum à la surface du doigt humain peut augmenter l'adhésion et donc le coefficient de frottement mesuré. Ceci pourrait expliquer la différence de valeurs entre les deux dispositifs de mesures.

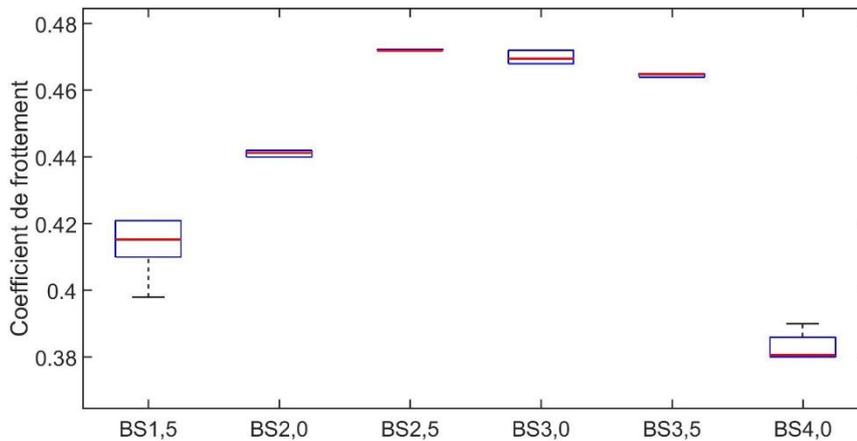


Figure 23 : Coefficient de frottement mesuré avec le doigt artificiel pour chaque feuille de base étudiée

Conclusion sur l'étude de la douceur réalisée avec le doigt artificiel

Les résultats obtenus avec le doigt artificiel montrent que le dispositif est répétable et qu'il permet une bonne discrimination des papiers en fonction de leur douceur. Tout comme avec le doigt humain instrumenté, nous remarquons que le niveau acoustique moyen est fortement négativement corrélé à la note de douceur, contrairement au coefficient de frottement.

Au vu des résultats, il semble que le doigt artificiel nous permette d'accéder aux mêmes informations avec une meilleure répétabilité et un temps de mesure inférieur (pas de panel de volontaires). Il est cependant important que le comportement du doigt artificiel soit représentatif de celui d'un doigt humain. Pour vérifier cela, nous avons réalisé une comparaison des résultats obtenus avec les deux dispositifs.

2.6.1.3. Comparaison doigt humain instrumenté versus doigt artificiel

La Figure 24 représente les valeurs des niveaux acoustiques moyens obtenus avec le doigt artificiel en fonction de ceux obtenus avec le doigt humain instrumenté, pour les six papiers en cellulose. Pour étudier la relation entre les valeurs, nous avons réalisé une corrélation de Spearman. Il faut noter que la corrélation de Spearman est utile pour étudier la corrélation lorsque la tendance est monotone mais pas forcément linéaire. Dans notre cas, l'analyse des corrélations révèle que les niveaux acoustiques moyens mesurés avec le doigt artificiel sont fortement corrélés avec ceux mesurés

avec le doigt humain instrumenté, avec un coefficient de corrélation égal à 0,91 et une valeur p inférieure à 0,05.

La Figure 25 représente les valeurs des coefficients de frottement obtenus avec le doigt artificiel en fonction de ceux obtenus avec le doigt humain instrumenté, pour les six papiers en cellulose. Pour étudier la relation entre les valeurs, nous avons réalisé une corrélation de Spearman. Bien que la corrélation soit plus faible que celle obtenue pour les niveaux acoustiques, elle reste importante et significative ($p < 0,05$) avec un coefficient de corrélation de 0,86.

En conclusion, le doigt artificiel permet de mimer le comportement du doigt humain. Il a l'avantage de ne pas nécessiter un panel de volontaires et de permettre des mesures rapides de la douceur des papiers en cellulose.

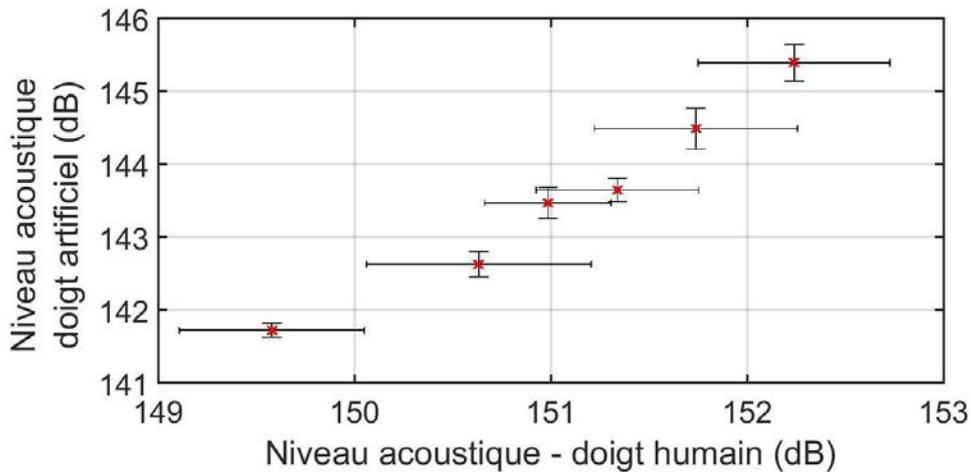


Figure 24 : Comparaison entre les niveaux acoustiques obtenus avec le doigt artificiel et ceux obtenus avec le doigt humain instrumenté (Corrélation de Spearman : $R=0.91$, $p < 0.05$)

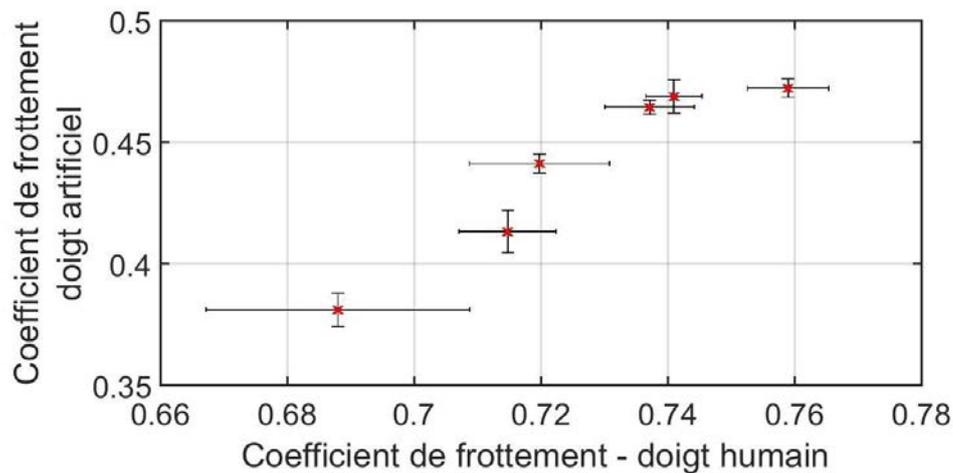


Figure 25 : Comparaison entre les coefficients de frottement obtenus avec le doigt artificiel et ceux obtenus avec le doigt humain instrumenté (Corrélation de Spearman : $R=0.86$, $p < 0.05$)

2.6.2. Analyse de la surface des papiers en cellulose

Dans la partie précédente, nous avons montré que le niveau acoustique moyen était un bon marqueur de la douceur des papiers en cellulose. Cependant, aucune relation n'a pu être mise en évidence avec le coefficient de frottement.

Dans une récente étude, Ramalho [90] a corrélé le coefficient de frottement de textiles avec leur rugosité et leur aspect plus ou moins « glissant ». Nous nous sommes donc intéressés à l'analyse

de surface des papiers en cellulose pour déterminer si le coefficient de frottement pouvait être relié à une de ses caractéristiques topographiques.

2.6.2.1. Topographie des papiers en cellulose

Pour chaque échantillon, trois mesures ont été réalisées car les papiers ne sont pas très homogènes. La Figure 26 présente un exemple d'images topographiques obtenues pour deux papiers en cellulose différents. On peut ainsi distinguer les lignes de crêpage (verticales sur l'image) et les fibres cellulosiques libres en surface.

A partir de ces images, nous avons ensuite réalisé une analyse en ondelettes de la surface pour obtenir son spectre de rugosité SMA.

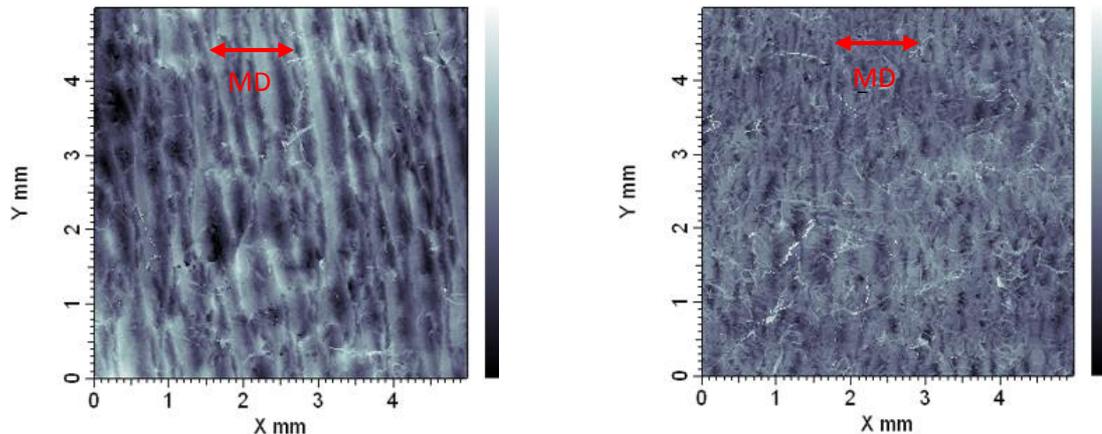


Figure 26: Exemple d'images topographiques obtenues avec le microscope confocal ; à gauche la BS1,5 et à droite la BS3,5

2.6.2.2. Comparaison des spectres SMA des papiers en cellulose

Les spectres SMA moyens ont été déterminés à partir de trois images obtenues pour trois zones différentes d'une même feuille de base. Ils sont représentés sur la Figure 27. Pour améliorer la visibilité du graphique, les écart-types ne sont pas représentés sur la figure.

Nous nous intéressons à la zone des longueurs d'onde allant jusqu'à 500 μm . Au-delà de 300 μm , le spectre SMA est nul. Ceci est cohérent avec le fait que le papier ne comporte ni ondulation ni forme. La surface des papiers n'est donc composée que de petites rugosités. En effet, les feuilles de base sont simplement crêpées mais elles n'ont subi encore aucun gaufrage (dessins macroscopiques).

Sur le spectre SMA, les lignes de crêpage correspondent à la zone des longueurs d'ondes comprises entre 200 et 300 μm environ. Les fibres cellulosiques sont, quant à elles, représentées par la zone de longueurs d'onde comprises entre 20 et 50 μm en moyenne, cela correspond au diamètre des fibres. Dans la zone de longueurs d'ondes correspondant au crêpage, le spectre de rugosité est proche d'une valeur nulle. On en déduit ainsi que le crêpage a peu d'impact sur la rugosité de surface du papier. Au contraire, on remarque que ce sont les fibres cellulosiques qui contribuent le plus à la topographie de la surface et donc à sa rugosité. En effet, le SMA maximal pour chaque papier est atteint dans la zone de longueurs d'onde correspondant aux fibres cellulosiques.

Les résultats montrent cinq spectres SMA différents et donc une signature morphologique différente pour chaque papier analysé.

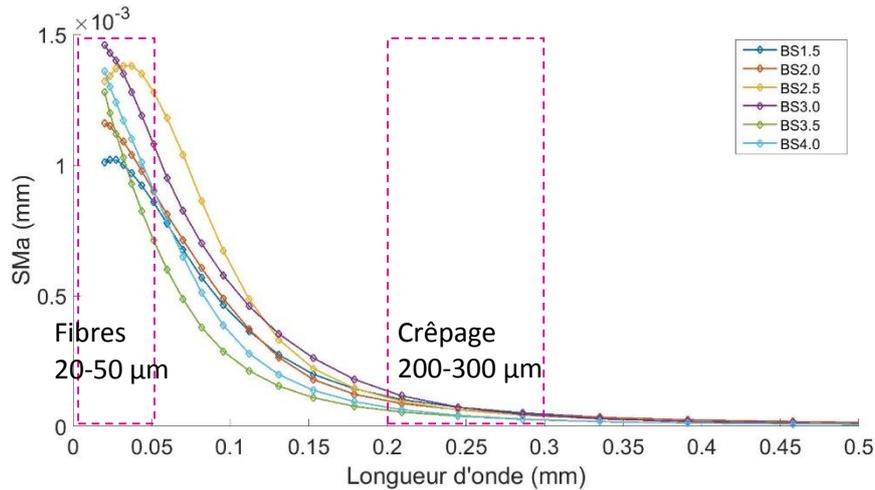


Figure 27 : Spectres SMA obtenus pour les six feuilles de base

De manière à avoir une valeur quantitative de rugosité pour chaque papier, nous avons choisi de calculer la valeur SMA moyenne sur la bande de longueurs d'onde correspondant aux fibres cellulosiques. La Figure 28 représente ce SMA moyen pour les papiers analysés dans cette étude. On remarque que la valeur de rugosité moyenne est différente pour chaque papier.

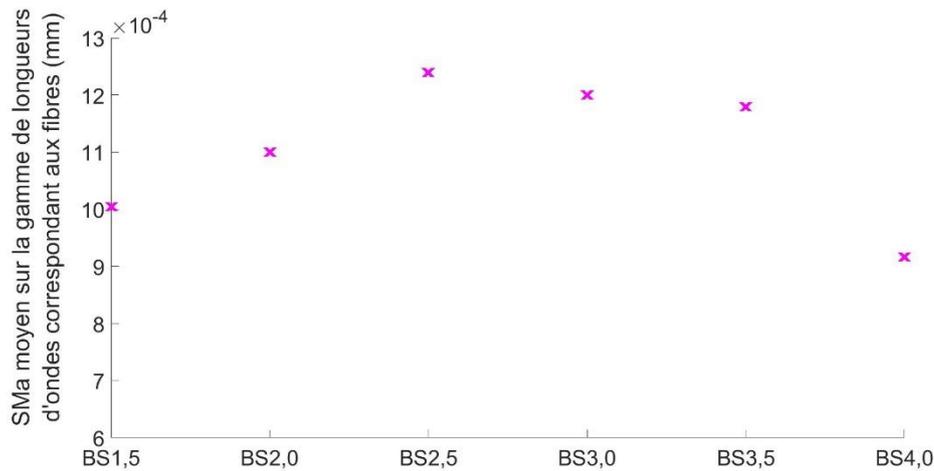


Figure 28 : SMA moyen dans la bande de longueur d'onde [20,50] µm pour chaque feuille de base

Comme nous l'avons vu précédemment, le coefficient de frottement a pu être relié à la rugosité de textiles [90]. Nous avons donc étudié la corrélation entre le coefficient de frottement obtenus avec le dispositif du doigt artificiel et le SMA moyen calculé dans la zone de longueurs d'onde correspondant aux fibres cellulosiques. La courbe obtenue est présentée en Figure 29. Pour un coefficient de frottement variant entre 0,69 et 0,76, le SMA moyen varie entre $9,1 \cdot 10^{-4}$ et $1,2 \cdot 10^{-3}$. On observe une forte corrélation positive entre le coefficient de frottement et le SMA moyen avec un coefficient de corrélation égale à 0,96 ($p < 0,05$).

On en déduit donc que le coefficient de frottement est principalement dû à la rugosité de surface des papiers et en particulier à la présence des fibres cellulosiques. Plus on a des fibres et plus la force de frottement est importante. On peut attribuer ce phénomène au fait que les fibres s'accrochent à la surface du doigt (artificiel ou humain) lors du frottement, augmentant ainsi la partie adhésive de la force de frottement. Ainsi, une quantité de fibres cellulosiques plus importante engendre un coefficient de frottement plus élevé.

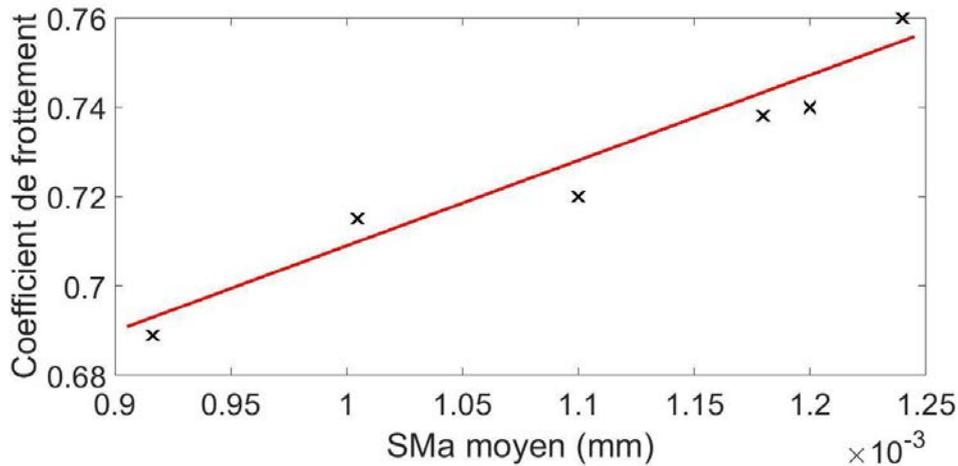


Figure 29 : Corrélation entre le coefficient de frottement et le SMA moyen dans la gamme des longueurs d'onde [20,50] μm (Corrélation de Spearman : $R=0.96$; $p<0,05$)

2.6.3. Signature des papiers en cellulose en fonction des paramètres quantitatifs mesurés

2.6.3.1. Le niveau acoustique moyen : indicateur de la douceur des papiers

Dans cette étude, nous avons mis en évidence la corrélation entre le niveau acoustique et la douceur des papiers. En effet, il apparaît clairement que plus la valeur du niveau acoustique est faible, plus le papier est perçu doux. Ainsi, le niveau acoustique est un bon marqueur objectif de la douceur des papiers.

2.6.3.2. Le coefficient de frottement : indicateur de la « pilosité » des papiers

L'analyse topographique des papiers a révélé que la rugosité était principalement due à la présence des fibres cellulosiques à la surface. De plus, nous avons mis en évidence une corrélation forte entre le coefficient de frottement et la rugosité (due aux fibres) des papiers en cellulose. Ainsi, on en conclut que le coefficient de frottement est un bon indicateur de l'aspect de surface du papier, c'est-à-dire de l'aspect duveteux ou lisse du papier. Ainsi, un papier dit « duveteux » (voir la BS3,5 de la Figure 26) a un coefficient de frottement plus élevé qu'un papier plus lisse (voir la BS1,5).

De manière générale, l'aspect lisse ou duveteux est en partie déterminé par le grammage du papier, c'est-à-dire la masse surfacique de fibres utilisées pour fabriquer le papier. En observant le Tableau 1, on remarque en effet que les papiers les plus lisses, les BS1,5, BS2,0 et BS4,0, (avec un SMA moyen faible) correspondent aux papiers avec le plus faible grammage. Inversement, les papiers avec un grammage important correspondent aux papiers duveteux avec un SMA moyen et un coefficient de frottement plus élevés.

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'évaluation physique de la qualité tactile des papiers en cellulose. Pour cela deux dispositifs ont été développés pour mesurer le coefficient de frottement et le niveau acoustique lors du toucher de papiers en cellulose : un doigt humain instrumenté et un doigt artificiel. Nous avons également réalisé des images topographiques de la surface des papiers. Ces images ont ensuite été traitées par ondelettes.

D'une part, les résultats ont montré que le niveau acoustique mesuré lors du frottement des papiers par le doigt artificiel était significativement corrélé à leur douceur. Ce niveau acoustique est

donc un marqueur de la douceur des papiers. Plus un papier est doux et plus le niveau acoustique a une valeur faible.

D'autre part, l'analyse topographique a montré que la rugosité des papiers était majoritairement due à la présence des fibres cellulosiques en surface. Nous avons également remarqué que cette rugosité était corrélée au coefficient de frottement mesuré avec le doigt artificiel. Nous avons donc conclu que le coefficient de frottement provenait de l'adhésion des fibres au doigt lors du frottement. Ainsi, plus il y a de fibres en surface et plus le coefficient de frottement est élevé.

Cette étude nous a permis de développer une méthode simple, rapide, reproductible et répétable pour évaluer la qualité tactile des papiers en cellulose avec un doigt artificiel. Son avantage réside dans le fait qu'elle permet d'avoir accès à des paramètres physiques quantitatifs et objectifs de la qualité tactile des papiers. Dans la suite du travail, nous utilisons les mêmes échantillons de papiers en cellulose, l'objectif étant de comprendre comment leur qualité tactile (douceur, pilosité) influe sur l'irritation cutanée engendrée lors du frottement répété sur la peau.

Chapitre 3

L'irritation de la peau : observation et méthodes d'évaluation

Sommaire

3.1.	Introduction	50
3.2.	Evaluation de l'irritation cutanée et de l'endommagement de la fonction barrière de la peau dans la littérature.....	50
3.2.1.	Signes d'irritation de la peau	50
3.2.2.	Dispositifs d'évaluation de l'irritation cutanée et de l'endommagement de la fonction barrière dans la littérature.....	50
3.2.2.1.	<i>Observation visuelle des signes d'irritation cutanée.....</i>	<i>50</i>
3.2.2.2.	<i>Méthodes biophysiques d'évaluation de l'irritation cutanée.....</i>	<i>51</i>
3.3.	Nouvelle approche de caractérisation mécanique de l'endommagement du <i>stratum corneum</i>	53
3.3.1.	Motivation pour le développement d'une nouvelle méthode de caractérisation mécanique de l'endommagement du <i>stratum corneum</i>.....	53
3.3.2.	Analyse des propriétés mécaniques de la peau par indentation sans contact	54
3.3.2.1.	<i>Dispositif expérimental d'indentation sans contact.....</i>	<i>54</i>
3.3.2.2.	<i>Essais d'impact in vivo : paramètres d'essai</i>	<i>55</i>
3.3.2.3.	<i>Evaluation du module d'élasticité de la peau</i>	<i>56</i>
3.3.3.	Protocole expérimental	58
3.3.3.1.	<i>Description du panel pour l'étude</i>	<i>58</i>
3.3.3.2.	<i>Protocole</i>	<i>58</i>
3.3.3.3.	<i>Analyses statistiques.....</i>	<i>58</i>
3.3.4.	Résultats de validation obtenus avec le dispositif d'indentation sans contact	59
3.3.4.1.	<i>Effet de l'âge et du sexe sur les propriétés mécaniques de la peau</i>	<i>59</i>
3.3.4.2.	<i>Effet de l'altération du <i>stratum corneum</i> sur les propriétés mécaniques de la peau</i>	<i>60</i>
3.4.	Conclusion.....	62

3.1. Introduction

La peau constitue la première barrière de protection de l'organisme. Cependant, elle est continuellement soumise à de multiples agressions extérieures. En particulier, lors du frottement répété de textiles sur la peau, une irritation cutanée plus ou moins sévère peut apparaître.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux différentes manifestations visibles ou non de l'irritation cutanée et à ses méthodes d'observation et de quantification. Dans un premier temps, nous recenserons l'ensemble des signes d'irritation observés dans la littérature. Nous proposerons ensuite un tour d'horizons des méthodes d'évaluation couramment utilisées. Enfin, nous présenterons un nouveau dispositif, développé dans le cadre de cette thèse, pour quantifier l'endommagement du *stratum corneum*.

3.2. Evaluation de l'irritation cutanée et de l'endommagement de la fonction barrière de la peau dans la littérature

3.2.1. Signes d'irritation de la peau

Une irritation cutanée est un phénomène couramment observé chez l'homme. Il se produit généralement à la suite de frottements répétés (lors de la pratique de sport, lors de l'essuyage de la peau avec des mouchoirs en papier...) ou à la suite d'un contact prolongé avec un produit irritant ou caustique (eau de Javel, détergent agressif...) [109].

Il s'agit d'une réaction inflammatoire limitée à la zone de contact et dont l'intensité varie en fonction de la durée et de la fréquence des applications.

L'irritation cutanée se reconnaît à des sensations de tiraillements, de picotements et d'échauffements de la peau qui peuvent être associées à des rougeurs ou érythèmes. La peau irritée peut être amenée à desquamer ou à se fissurer. Il a également été montré que l'irritation cutanée entraînait une augmentation de la PIE de la peau [2].

3.2.2. Dispositifs d'évaluation de l'irritation cutanée et de l'endommagement de la fonction barrière

De nombreux dispositifs existent pour évaluer la présence d'irritation cutanée et l'état d'endommagement de la fonction barrière de la peau [110]. Toutes ces méthodes s'appuient sur l'évaluation de paramètres relatifs à l'état de la peau tels que sa couleur, son taux d'hydratation, sa PIE ou son flux sanguin microcirculatoire.

On peut distinguer deux grands types de méthodes d'évaluation de l'irritation cutanée : les méthodes d'observation visuelle et les méthodes biophysiques.

3.2.2.1. Observation visuelle des signes d'irritation cutanée

Dans son étude, Farage [111] a évalué l'irritation de la peau par une lecture visuelle de l'état de la peau. Pour cela, une cotation de l'érythème et de la sécheresse cutanée sont réalisées chacune sur une échelle de 0 à 5. Sur cette échelle, le 0 représente une peau saine pour l'érythème comme pour la sécheresse cutanée. Dans le cas de l'érythème, la valeur 5 est attribuée en cas d'érythème sévère. Pour la sécheresse cutanée, la valeur 5 correspond à la présence de fissures de la peau. Bien que la lecture visuelle soit standardisée, elle demeure une évaluation subjective de l'irritation cutanée qui repose en particulier sur l'expérience du clinicien. C'est pourquoi la lecture visuelle est souvent complétée ou remplacée par une évaluation biophysique de l'irritation cutanée [112].

3.2.2.2. *Méthodes biophysiques d'évaluation de l'irritation cutanée*

Les méthodes biophysiques ont l'avantage d'être purement objectives puisqu'elles reposent chacune sur la mesure directe d'un changement physiologique de la peau.

Mesure de la rougeur

La peau normale a une composante érythémateuse qui provient du plexus vasculaire sous-papillaire visible à travers le *stratum corneum* [2]. L'érythème se traduit par une accentuation de cette composante érythémateuse, d'où la rougeur.

La composante érythémateuse de la peau peut être évaluée par des mesures colorimétriques (chromamètre, spectromètre...). Les colorimètres utilisent la réflectance de trois longueurs d'onde situées dans le rouge, le vert et le bleu, puis ils l'expriment par les paramètres L^* , a^* et b^* de la Commission Internationale de l'Eclairage. Ce système permet d'avoir une définition absolue de la couleur en déterminant sa position dans un espace virtuel 3D. La dimension L^* définit la clarté de la peau allant de zéro (noir) à 100 (blanc). L'axe a^* représente la rougeur (de $-a^*$ =vert à $+a^*$ =rouge) et l'axe b^* le « jaune » (de $-b^*$ =bleu à $+b^*$ =jaune). Dans son étude, Poon a montré que le paramètre a^* était linéairement corrélé à l'érythème [113]. En effet, un érythème augmente le paramètre a^* et diminue le paramètre L^* , mais L^* est moins bien corrélé à l'érythème que le a^* . Ainsi, un érythème se différencie de la peau normale (saine) par une valeur de a^* plus élevée. Trookman a en particulier montré qu'après une irritation chimique sévère de la peau, le a^* était multiplié par 2 [114].

Ces mesures colorimétriques sont très efficaces pour mesurer un érythème. Cependant, une irritation cutanée n'est pas systématiquement accompagnée de rougeur. C'est pourquoi il est important de combiner cette méthode avec une autre méthode d'évaluation pour conclure sur le degré d'irritation cutanée.

Mesure du niveau d'hydratation de la peau

La mesure des propriétés électriques de la peau est largement utilisée pour évaluer le degré d'hydratation de la peau [115]–[117]. En effet, les propriétés électriques de la peau sont directement reliées à la teneur en eau du *stratum corneum* [118]. Une augmentation de l'hydratation de la peau se traduit par une diminution de la capacitance et de l'impédance de la peau [119]. La mesure de l'hydratation de la peau a souvent été utilisée pour étudier l'effet irritant de certains produits [111], [114].

Le cornéomètre utilise le principe de la capacitance diélectrique. Le *stratum corneum* est caractérisé par une valeur moyenne de diélectrique. Les propriétés du diélectrique varient avec la quantité d'eau contenue dans le *stratum corneum*. La valeur du diélectrique de l'eau (81) est très différente de nombreuses autres substances contenues dans la peau (<7). Ainsi, cela assure une mesure très sélective, contrairement aux méthodes qui utilisent le principe de l'impédance. Le capteur est composé de deux électrodes métalliques (or) en forme de peigne. Une fine couche isolante sépare les électrodes sur l'extrémité de la sonde en contact avec la peau. L'alimentation du circuit électrique induit un champ électrique à travers le *stratum corneum* et un courant électrique entre les deux électrodes. L'appareillage mesure la capacitance correspondante.

Mesure de la perfusion sanguine

Depuis plusieurs années, la technique de fluxmétrie laser Doppler est fréquemment utilisée en recherche clinique [120], [121]. Elle donne des informations sur l'état de la microcirculation du sujet et des renseignements essentiels pour des évaluations spécifiques de l'état vasculaire d'organes. Dans le cas de l'observation de maladies de la peau, telles que l'ulcère des jambes ou le psoriasis, la dermatologie peut aussi avoir recours à la technique de fluxmétrie laser Doppler [122], [123]. Par

ailleurs, la technique est également utilisée en allergologie, notamment pour visualiser et quantifier l'érythème produit par un irritant appliqué sur la peau [124]–[126].

Actuellement, l'utilisation clinique des signaux de fluxmétrie laser Doppler consiste à observer la variation du signal de perfusion sanguine suite à un stimulus. La perfusion sanguine a été mesurée pour la première fois *in vivo* en 1975 [127]. Le principe utilisé est le suivant : lorsqu'une lumière laser arrive sur la peau, certains photons sont diffusés par des particules en mouvement, et d'autres par des tissus statiques. Lorsqu'une interaction se produit avec des particules en mouvement, comme les globules rouges, les photons diffusés subissent un décalage en fréquence déterminé par l'angle de diffusion, la longueur d'onde et la vitesse du diffuseur. Ainsi, la part de photons (parmi tous les photons diffusés) ayant subi un décalage fréquentiel est reliée au nombre de globules rouges présents dans le volume étudié. La vitesse des globules rouges est quant à elle reliée à la valeur du décalage fréquentiel. La valeur de la perfusion sanguine correspond au produit de la concentration en globules rouges avec la vitesse de ceux-ci. Elle est exprimée en unités arbitraires.

La plupart des moniteurs laser Doppler utilisent des fibres optiques pour transporter la lumière laser. Actuellement, la longueur d'onde la plus utilisée est de 780 nm car elle offre une bonne pénétration et une faible dépendance vis-à-vis de la couleur de la peau.

Expérimentalement, le signal de perfusion sanguine est très différent d'une zone étudiée à l'autre. On doit cette hétérogénéité à la répartition non homogène des artérioles et veinules superficielles. Des chercheurs ont ainsi montré que sur la face dorsale de l'avant-bras, le signal de perfusion pouvait varier d'une unité arbitraire lors d'un écart de 2,5 mm [128]. De plus, plusieurs mesures de la perfusion sanguine, à un même endroit et de manière répétée, peuvent conduire à des valeurs différentes. C'est pourquoi on a souvent qualifié cette technologie de non reproductible. Cependant, les enregistrements réalisés sur des outils d'étalonnage ou des modèles physiques, ayant un flux bien contrôlé, sont hautement reproductibles [129]. Ainsi, la non reproductibilité ne peut pas être due à des facteurs liés à l'instrument. En effet, la perfusion sanguine varie temporellement et spatialement [128]. Pour réduire ces variations, il est conseillé de conserver une même température ambiante durant tout l'enregistrement et de ne commencer les mesures qu'après une période d'acclimatation de quelques minutes [130].

Mesure de la Perte Insensible en Eau (PIE)

La mesure de la PIE est un outil non invasif très utilisé pour évaluer les changements dans la fonction barrière du *stratum corneum*. Cette mesure révèle la diffusion passive de l'eau et celle relative à la transpiration. Un grand nombre d'études ont montré que l'augmentation de la PIE était liée à une altération de la fonction barrière [131], [132]. Inversement, une diminution de la PIE signifierait une restauration de cette fonction [133].

La mesure de la PIE est basée sur l'estimation du gradient de vapeur d'eau dans une chambre de mesure [134]. La loi de diffusion de Fick donne la relation entre la concentration en eau dans la peau et le flux :

$$J = -D \times \frac{dc}{dx}$$

Où :

J est le flux de diffusion en g/m.h

D est le coefficient de diffusion

c est la concentration en eau

x est la distance de la surface de la peau jusqu'au point de mesure

Et $\frac{dc}{dx}$ est le gradient de concentration de l'eau

Lors de la mesure de la PIE, différents facteurs sont à prendre en compte tels que les conditions environnementales de mesure (température, humidité) mais également les variations anatomiques comme l'âge, le sexe, le type de peau [133], [135].

Plusieurs appareils ont été développés pour la mesure de la PIE. On distingue en particulier la méthode à chambre ouverte et celle à chambre fermée. La méthode à chambre ouverte utilise une capsule directement en contact avec l'atmosphère. Il est donc important de contrôler l'environnement dans lequel se fait la mesure pour que les résultats ne dépendent pas des changements d'humidité ambiante ou de température [136]. Au contraire, les appareils à chambre fermée ne sont pas influencés par l'environnement extérieur. Cependant, ils induisent une occlusion de la peau qui n'est pas souhaitable.

3.3. Nouvelle approche de caractérisation mécanique de l'endommagement du *stratum corneum*

3.3.1. Motivation pour le développement d'une nouvelle méthode de caractérisation mécanique de l'endommagement du *stratum corneum*

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'irritation de la peau induite par une action de frottement répété sur cette dernière. Ce frottement répété entraîne une abrasion du *stratum corneum* visible à travers une desquamation des cellules de peau [137]. Cette abrasion engendre une diminution de l'épaisseur du *stratum corneum*. Chen s'est intéressé à l'effet de la diminution d'épaisseur de la couche cornée sur les propriétés mécaniques de la peau [138]. Pour cela, il a utilisé la technique de « tape stripping » pour arracher des couches de cornéocytes. Cette technique consiste à enlever une couche de cellules de peau en appliquant successivement des rubans adhésifs sur la peau. Après chaque cycle de 5 rubans adhésifs, il a mesuré le module d'élasticité de la peau par indentation ainsi que sa perte insensible en eau (PIE). Ses résultats ont montré que le module d'élasticité de la peau diminuait et que sa PIE augmentait en fonction du nombre de rubans adhésifs utilisés. D'une part, il a conclu que plus on enlève des couches superficielles de peau, plus le module d'élasticité de la peau diminue. Et d'autre part, la diminution du module d'élasticité réduit peut être dû à un ramollissement de la surface de la peau due à l'augmentation de la PIE. Cette conclusion a motivé notre volonté de caractériser mécaniquement l'endommagement du *stratum corneum* qui est relié au degré d'irritation de la peau.

L'évaluation des propriétés mécaniques de la peau a fait l'objet de nombreuses études. De nombreux types de sollicitations mécaniques sont utilisables : élongation, compression, succion, indentation, torsion... Plus récemment, Boyer a développé un dispositif d'indentation sans contact, appelé *Tonoderm*®, adapté aux mesures sur la peau [30]. Ce dispositif s'inspire des techniques d'ophtalmologie pour évaluer la pression intra oculaire grâce à l'envoi d'un jet d'air sur la cornée. Le principe du dispositif consiste à envoyer un jet d'air à la surface de la peau et à mesurer sa déformation avec un capteur à triangulation laser. Contrairement aux autres méthodes, celle-ci a l'avantage d'éviter tout contact avec la peau lors de la mesure et donc d'empêcher toute altération de la zone mesurée. Elle permet aussi de supprimer les phénomènes d'adhésion entre l'indenteur et la surface de peau comme c'est le cas pour l'indentation classique par exemple. Enfin, le fait de ne pas avoir de contact permet de supprimer instantanément la contrainte appliquée sur la peau, ce qui n'est pas le cas du fait de l'inertie de l'indenteur dans le cas de l'indentation classique.

Par la suite, Djaghoul s'est intéressé à la génération et au suivi de la propagation d'onde dans la peau suite à une sollicitation par impact d'air [139]. La mesure de la vitesse de propagation de l'onde a été réalisée par un vélocimètre laser placé à une distance de 30 mm de la sollicitation. Il a ainsi pu mettre en évidence une différence significative des propriétés mécaniques en fonction de l'âge et du sexe. L'inconvénient de ce dispositif est qu'il ne permet d'avoir une mesure qu'en un point donné de la peau. Nous avons donc adapté ce dispositif pour permettre une mesure plus étendue des propriétés mécaniques de la peau. Ce dispositif est présenté dans la suite du chapitre.

3.3.2. Analyse des propriétés mécaniques de la peau par indentation sans contact

3.3.2.1. Dispositif expérimental d'indentation sans contact

La Figure 30 présente le dispositif d'indentation sans contact développé dans le but de mesurer les propriétés mécaniques de la peau. Le test consiste à envoyer un jet d'air à la surface de la peau et à suivre la propagation de l'onde générée.

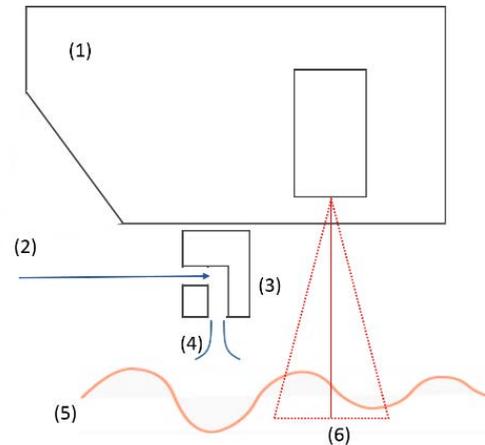


Figure 30 : (a) Dispositif d'indentation sans contact pour un essai sur l'avant-bras, (b) Schéma de principe du dispositif d'indentation sans contact : (1) le dispositif laser, (2) l'arrivée d'air, (3) la sortie d'air, (4) le jet d'air envoyé sur la peau, (5) la surface de la peau et (6) la ligne laser projetée sur la surface de la peau.

Un compresseur fournit la source d'air nécessaire au système. Il permet d'envoyer une pression d'air allant de 0 à 12 bars. Un régulateur de pression associé avec un manomètre permet ensuite de régler la pression de l'air à une valeur prédéfinie. La pression peut varier entre 0 et 4 bars. L'air arrive ensuite au niveau d'une électrovanne qui va gérer le passage ou le blocage instantané de l'air. L'électrovanne est gérée par un programme développé sous LabView et permet de définir le temps de maintien du jet d'air. Le temps de maintien varie entre 4 ms et 600 ms. Lorsque l'électrovanne autorise le passage de l'air, celui-ci est envoyé directement au niveau d'une buse dirigée vers la surface de la peau, comme représentée sur la Figure 30. Cette buse possède un diamètre intérieur égal à 1 mm de manière à avoir un jet d'air très concentré sur la peau.

Le jet d'air envoyé sur la peau génère une onde de surface. Cette onde est dite de Rayleigh, du nom de celui qui l'a découverte. Cette onde a la particularité d'être beaucoup plus énergétique que les ondes de volume (compression, cisaillement). Prépondérante en surface, sa contribution s'annule très vite en profondeur, au profit des ondes de volume. La mesure de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh est réalisée par un dispositif laser linéaire (LJ-V7020, Keyence). Le laser est une lumière bleue de longueur d'onde égale à 405 nm. Ce dispositif est constitué d'une ligne laser de 800 capteurs répartis homogènement sur une longueur de 7 mm. Ce dispositif permet de mesurer l'altitude de chaque capteur par rapport à une altitude de référence, en fonction du temps. L'altitude de référence correspond à une distance de 20 mm entre la source laser et la surface mesurée. Le laser permet alors une mesure de $\pm 3,5$ mm par rapport à cette distance de référence. Ainsi, le dispositif laser permet d'avoir l'évolution d'un profil de peau en fonction du temps. L'objectif est d'enregistrer la variation du profil de peau au cours de la sollicitation par jet d'air et d'observer le retour naturel de la peau après l'arrêt de la sollicitation. Pour rendre cela possible, le déclenchement du jet d'air se fait 50 ms après le début d'enregistrement des profils de peau avec le laser. Ce déclenchement est géré automatiquement sous LabView.

Dans le dispositif d'indentation sans contact (dispositif de génération du jet d'air + laser), nous avons deux configurations de positionnement possibles de la sortie d'air par rapport au laser ligne. Ces deux configurations sont présentées en Figure 31. La ligne laser est toujours parallèle à l'axe du bras. La première configuration consiste à placer la sortie d'air à 6 mm du premier capteur de la ligne laser.

Cette première configuration a l'avantage de permettre une mesure de vitesses de propagation sur toute la longueur de la ligne et donc d'améliorer la précision des mesures. Dans la seconde configuration, la sortie d'air est centrée sur la ligne laser. On utilise cette configuration dans l'étude de l'anisotropie des propriétés mécaniques de la peau car elle permet d'avoir accès à deux directions de mesure en un seul test.

L'ensemble du système {Génération du jet d'air + Laser ligne} est piloté par un ordinateur associé à une carte analogique/numérique National Instruments. Un programme développé sous LabView permet la gestion du pilotage des électrovannes (choix de la durée de maintien du jet), le choix de la configuration de mesure (buse déportée ou buse centrée sur la ligne laser), l'acquisition du profil de peau par le laser.

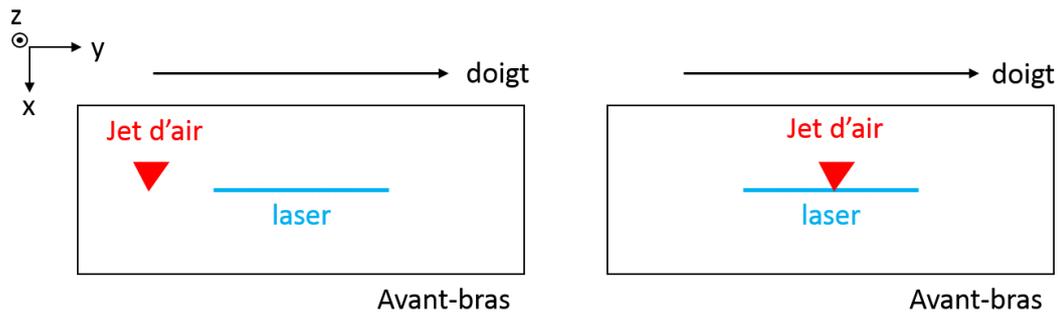


Figure 31 : Configurations possibles pour le dispositif d'indentation sans contact (vue de dessus)

Comme pour tous dispositifs destinés à la mesure *in vivo*, le dispositif d'indentation sans contact est fixé sur un bâti permettant un positionnement aisé de l'appareil sur la zone de mesure. Une platine de translation selon l'axe z permet de placer le dispositif à sa distance optimale, 20 mm entre le laser et la surface de la peau. Deux plateaux tournants permettent de positionner la ligne laser parallèlement à la surface de la peau dans le plan (xOy). Enfin, un dernier plateau tournant permet de réaliser des mesures d'anisotropie en permettant une rotation du dispositif autour de l'axe z passant par le milieu de la ligne laser.

3.3.2.2. Essais d'impact *in vivo* : paramètres d'essai

Pour nos mesures sur l'avant-bras, nous avons choisi de travailler dans la première configuration, c'est-à-dire avec la buse déportée par rapport à la ligne laser, pour avoir une meilleure observation de la propagation d'onde surfacique (ou ondes de Rayleigh).

Les paramètres d'essai définis pour l'impact sont décrits dans le Tableau 4. La pression du jet d'air envoyé à la surface de la peau est fixée à 1 bar pour tous les sujets. Elle a été choisie de manière à engendrer une déformation de la peau observable avec le dispositif laser (de l'ordre de 1 mm) mais pas trop importante pour éviter d'avoir l'effet des couches profondes de la peau. Le temps de maintien du jet est de 4 ms pour l'essai d'impact, ce qui correspond à la durée minimale que l'on puisse atteindre avec le dispositif. La propagation de l'onde est suivie sur 1500 ms avec le dispositif laser à une fréquence d'échantillonnage de 8 kHz (maximum du dispositif).

Tableau 4 : Valeurs des paramètres d'essai pour l'essai d'impact d'air sur la peau

Paramètres	Valeurs
Pression de l'air	1 bar
Temps de maintien du jet d'air	4 ms
Temps total de mesure avec le laser	1500 ms
Distance jet-zone de mesure	10 mm
Fréquence d'échantillonnage du laser	8 kHz

3.3.2.3. Evaluation du module d'élasticité de la peau

Relation entre la vitesse de propagation de l'onde et le module d'élasticité de la peau

De manière générale, lorsqu'un matériau est stimulé par un impact, des ondes de propagation sont générées dans le matériau. Parmi ces ondes, les ondes de surface, appelées ondes de Rayleigh, ont souvent été utilisées pour caractériser les propriétés mécaniques de différents matériaux [140]. Pour un matériau homogène et isotrope, la vitesse de propagation v de l'onde peut être approximée par la relation suivante :

$$v = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}}$$

Où E est le module de Young, ν est le coefficient de Poisson et ρ est la densité du matériau.

La peau est un matériau multicouche qui ne remplit pas les conditions d'élasticité, d'isotropie et d'homogénéité dans son comportement global. Cependant, comme on utilise des petites perturbations de surface, on peut faire l'hypothèse que le comportement de la peau se rapproche du comportement d'un matériau élastique. Cette hypothèse est également appuyée par la valeur du nombre de Deborah, $D_e = \frac{\text{temps de relaxation de la peau}}{\text{temps caractéristique de mesure}}$, estimée. En effet, pour nos mesures, le temps de relaxation moyen de la peau est de l'ordre de 200 ms et le temps caractéristique de la mesure est de 1500 ms, soit un nombre de Deborah égal à 0,13 donc très proche de 0. Or, on considère le comportement d'un matériau comme préférentiellement élastique pour un nombre de Deborah tendant vers 0.

En ce qui concerne les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie, on peut les considérer comme satisfaites sur la petite zone de mesure. En effet, avec le dispositif expérimental, nous évaluons des propriétés locales de la peau car restreintes aux dimensions de la ligne laser. Ainsi, dans la suite, nous utiliserons la relation ci-dessus pour évaluer un module de Young local de la peau. Le coefficient de Poisson sera pris égal à 0,5 et la densité égale à 1,02 g/cm³ [141].

Evaluation de la vitesse de propagation de l'onde

Après un test avec le dispositif d'indentation sans contact, on obtient une matrice de valeurs d'altitude pour chaque capteur laser en fonction du temps. Chaque colonne correspond à l'évolution d'altitude d'un capteur en fonction du temps et chaque ligne correspond à un temps donné. Comme nous travaillons à 8 kHz, 8000 profils sont mesurés en 1 s, soit 12000 profils pour l'ensemble de la mesure. Nous savons que les 800 capteurs sont répartis de façon homogène sur une ligne de 7 mm. Nous pouvons ainsi transformer les valeurs de capteurs en distance calculée à partir du premier capteur de la ligne laser.

La

Figure 32(a) représente une image 3D typique de la peau obtenue avec le dispositif laser après un impact sur la peau de 4 ms. L'axe des abscisses représente les positions des capteurs de la ligne laser, c'est l'axe spatial. La position 0 correspond au capteur le plus proche de la sollicitation. L'axe des ordonnées représente le temps. L'axe vertical correspond aux amplitudes de déformation de la surface de la peau.

La Figure 32(b) présente un profil de peau obtenu pour un capteur particulier de la ligne laser. Ce même profil est obtenu pour chaque capteur, la différence réside dans la localisation du minimum dans le temps et de son amplitude. Plus on s'éloigne de la sollicitation par jet d'air, plus l'amplitude du creux s'atténue et plus il est « ressenti » tard dans le temps. Pour évaluer la vitesse de propagation de l'onde, on localise le minimum de la courbe pour chaque capteur et le temps auquel il est atteint.

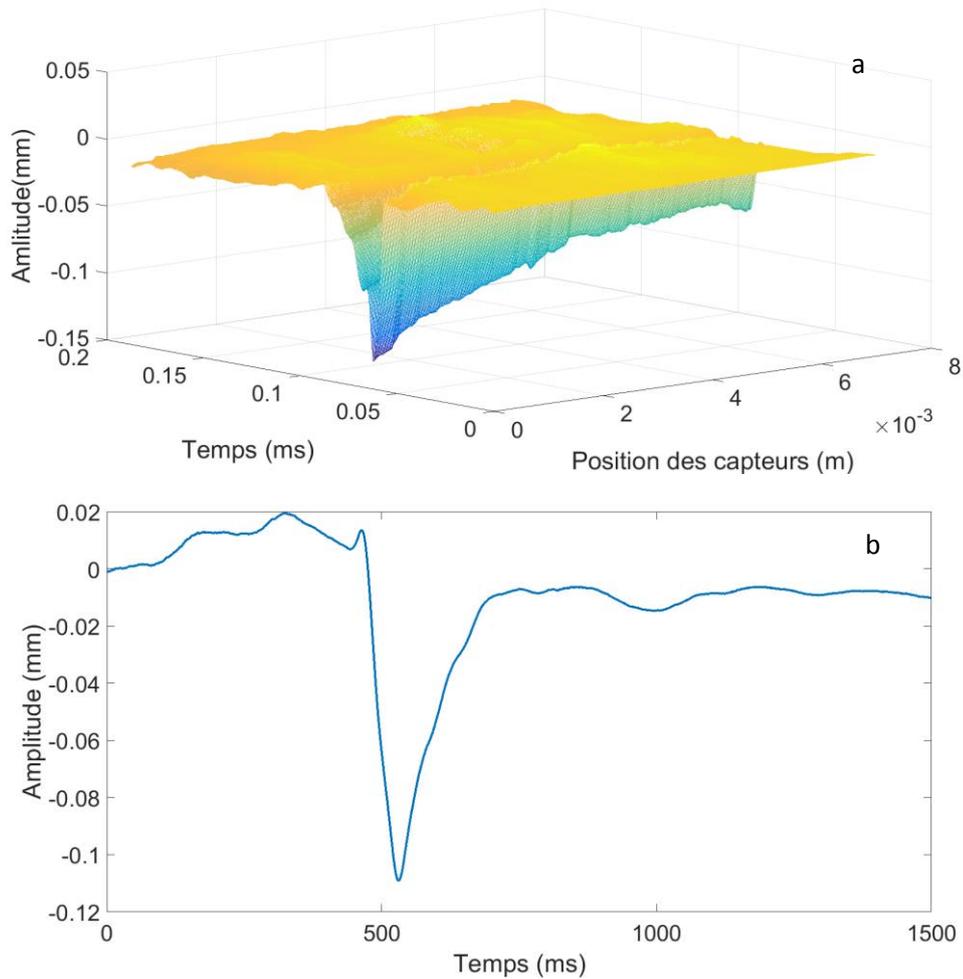


Figure 32 (a) Image 3D de la peau suite à un essai d'indentation sans contact, (b) Profil de peau pour un capteur suite à un essai d'indentation sans contact

La Figure 33 représente la méthode d'évaluation de la vitesse de propagation de l'onde par détection de la crête. Pour faciliter la détection, on a inversé l'image : les minima deviennent des maxima, mais le raisonnement reste le même. On détecte les temps auxquels les maxima sont atteints pour chaque capteur dont on connaît la position. On peut ainsi calculer la vitesse de propagation de l'onde v telle que : $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ avec Δx la distance entre deux capteurs et Δt le temps mis par l'onde pour se propager entre les deux capteurs.

En pratique, on calcule une vitesse de propagation moyenne sur toute la ligne. Pour cela, un programme développé sous Matlab permet de détecter la crête de maxima et de trouver son équation affine. Le coefficient directeur de la droite correspond à l'inverse de la vitesse de propagation. A partir de cette vitesse, on en déduit un module de Young avec l'équation simplifiée évoquée ci-dessus.

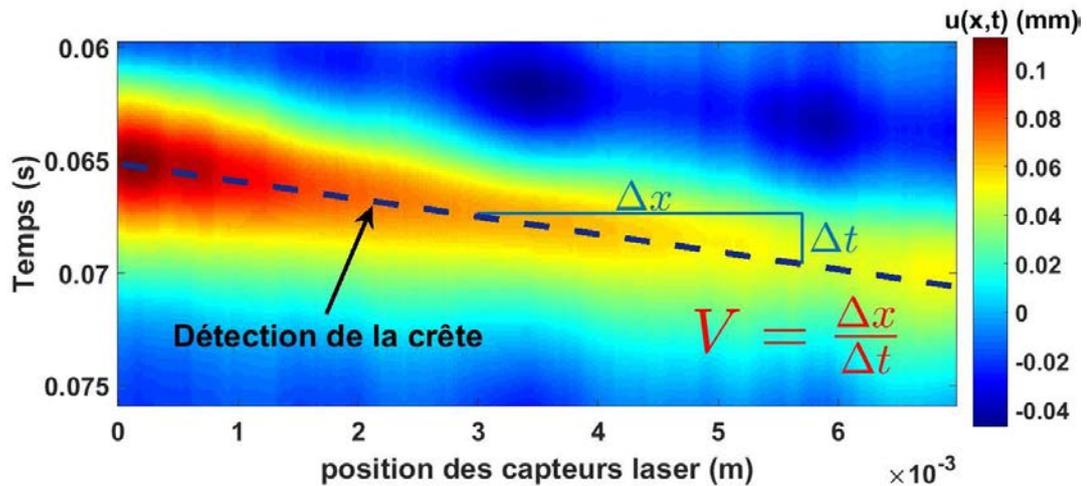


Figure 33 : Evaluation de la vitesse de propagation de l'onde par détection de la crête du signal

3.3.3. Protocole expérimental

3.3.3.1. Description du panel pour l'étude

Au total, cinquante-neuf volontaires caucasiens ont participé à l'étude : trente-et-une femmes et vingt-huit hommes répartis en quatre classes d'âge. La description du panel est présentée dans le Tableau 5. Le panel est le même pour toutes les mesures *in vivo*.

Tableau 5 : Descriptif du panel d'étude

	Groupe 1		Groupe 2		Groupe 3		Groupe 4	
Classe d'âge	20-29 ans		30-39 ans		40-49 ans		≥ 50 ans	
Sexe	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme
Effectif	10	11	6	7	6	8	6	5
Age moyen	24,5±4,5	26,6±3,8	34,2±3,4	35,3±3,0	46±2,7	44±3,8	56,3±5,6	55,6±5,3

3.3.3.2. Protocole

Les volontaires ne doivent pas utiliser de crème sur la zone de mesure 24h avant le test.

Avant chaque série de mesures, le volontaire a respecté une période d'acclimatation de dix minutes minimum dans la salle de mesures, dont la température et l'humidité ont été fixées respectivement à 23±2°C et 55±5%. Toutes les mesures ont été réalisées sur la face interne de l'avant-bras droit des sujets, à 6 cm du coude.

Pour chaque essai, trois mesures sont réalisées à la suite et on effectue la moyenne des trois.

Les essais *in vivo* pose le problème de l'immobilité du sujet lors de la mesure. En effet, tout mouvement du sujet va changer la distance entre la sortie du jet d'air et la zone de mesure. Pour éviter au maximum les mouvements du sujet au cours de l'essai, le volontaire est installé dans un fauteuil et son bras est maintenu par un dispositif de « repose-bras ».

3.3.3.3. Analyses statistiques

Pour comparer les valeurs obtenues pour les différents groupes, nous avons utilisé une ANOVA. Le principe de cette analyse statistique a été décrit en 2.2.1. Une différence significative entre les groupes ($p < 0,05$) est indiquée par une étoile (*).

3.3.4. Résultats de validation obtenus avec le dispositif d'indentation sans contact

3.3.4.1. Effet de l'âge et du sexe sur les propriétés mécaniques de la peau

La Figure 34 présente les Box Plot des vitesses de propagation pour tous les groupes de sujets. En magenta sont présentées les femmes et en bleu, les hommes. La médiane pour chaque groupe est indiquée en rouge. Les résultats montrent globalement que les vitesses de propagation d'onde sont significativement plus élevées pour les hommes que pour les femmes ($p < 0,05$). Pour les hommes, les vitesses médianes vont de 2,05 m/s, pour les hommes âgés de 20 à 29 ans, à 1,41 m/s pour les hommes âgés de plus de 50 ans. Cela correspond à une baisse significative ($p = 0,0149$) d'environ 30% de la vitesse de propagation d'onde. Pour les femmes, cette baisse est également significative ($p = 0,0101$) et atteint presque 50% avec une vitesse médiane qui passe de 1,5 m/s, pour les femmes âgées de 20 à 29 ans, à 0,76 m/s pour celles âgées de plus de 50 ans. On remarque que la diminution de la vitesse de propagation n'est pas linéaire. En effet, pour les hommes, elle s'accroît entre les groupes 3 et 4, soit autour de 50 ans. Pour les femmes, cette accentuation a lieu plus tôt, entre les groupes 2 et 3, soit autour de 40 ans.

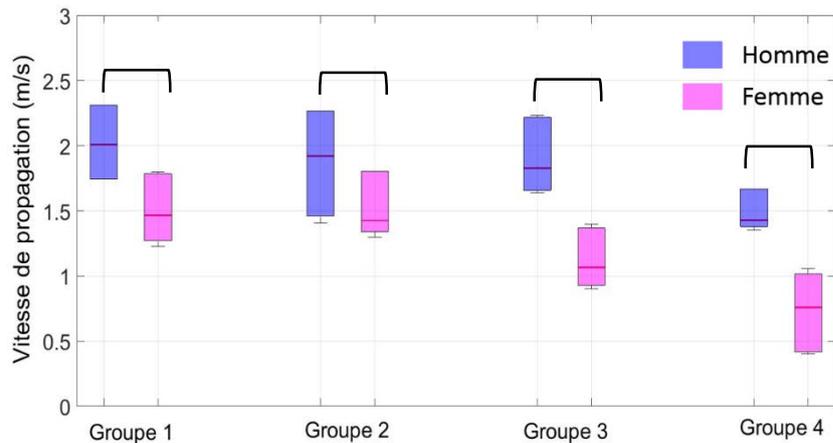


Figure 34 : Box Plot des vitesses de propagation mesurées pour les différents groupes

La Figure 35 présente les Box Plot des modules de Young calculés à partir des vitesses de propagation selon la formule décrite, pour tous les groupes de sujets. On peut faire les mêmes observations que pour les vitesses de propagation.

Les modules de Young sont significativement plus faibles chez les femmes ($p < 0,05$) pour tous les groupes d'âge. Ces résultats sont en corrélation avec une étude précédente réalisée sur une population caucasienne de 77 sujets, hommes et femmes, âgés de 20 à 70 ans [139]. Des études ont montré que la peau des hommes étaient toujours plus épaisses que celles des femmes à tous les âges [142]. D'après les auteurs, ceci serait dû à une quantité plus importante de collagène chez les hommes. Ces différences homme-femme, au niveau des quantités de collagène, pourraient être à l'origine de la différence de module de Young observée.

On remarque également que les modules de Young diminuent significativement avec l'âge pour les hommes et pour les femmes. Cette baisse s'accroît chez les femmes autour de 40 ans, le module de Young subissant une baisse d'environ 20% en passant de la classe d'âge [30 : 40] ans à celle de [40 : 50] ans. Chez les hommes, cette baisse de 20% du module de Young s'effectue plutôt autour de 50 ans. Ces résultats sont cohérents avec l'étude de Boyer *et al.*, dans laquelle un dispositif d'indentation sans contact a été utilisé pour évaluer les propriétés mécaniques de la peau de l'avant-bras de femmes d'origine caucasienne [143]. Ils ont trouvé un module de Young de 14,38 kPa pour les femmes âgées de 23±2 ans, et un module de 6,2 kPa pour le groupe de femmes âgées de 60,4±2 ans. Enfin, le fait que la diminution des propriétés mécaniques de la peau s'accroît plus rapidement chez les femmes semble témoigner de la différence de vitesse de vieillissement en fonction du sexe.

La diminution des propriétés mécaniques de la peau avec le processus de vieillissement peut être expliquée par l'altération globale du réseau de fibres de collagène et d'élastines [144]–[146]. Boisnic [144] décrit le réseau de fibres comme un réseau plus fragmenté et moins dense avec l'âge, avec un nombre de fibres d'élastine en baisse [147]. De manière générale, l'endommagement des propriétés mécaniques de la peau coïncide avec la baisse des propriétés des fibres de collagène et d'élastine du derme. Cette baisse des propriétés mécaniques est due à l'endommagement et au changement de structure des fibres avec l'avancée en âge [148], [149].

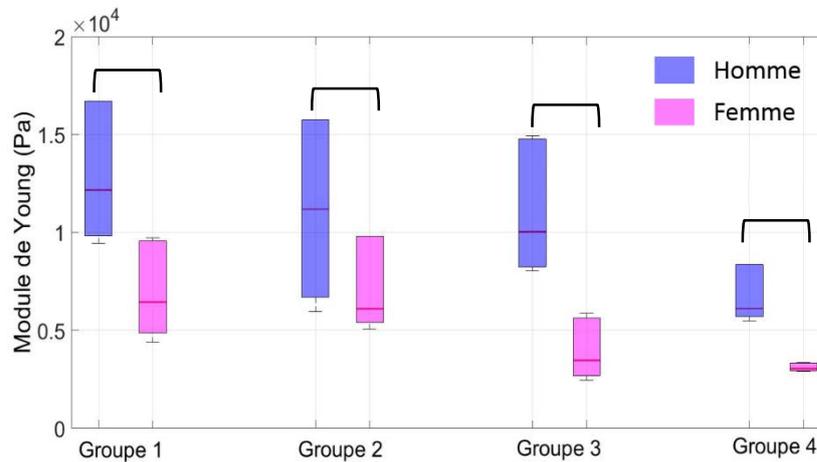


Figure 35 : Box Plot des modules de Young calculés pour les différents groupes

L'étude du vieillissement est généralement la première étape de validation d'un nouveau dispositif de mesure des propriétés mécaniques de la peau. Elle permet de situer les mesures obtenues et de quantifier la capacité de l'appareil à distinguer deux peaux différentes. Nos résultats confirment la capacité de l'appareil à évaluer les différences de propriétés mécaniques de la peau *in vivo* en fonction de l'âge et du sexe.

3.3.4.2. Effet de l'altération du *stratum corneum* sur les propriétés mécaniques de la peau

Pour valider la capacité du dispositif à évaluer une altération du *stratum corneum*, nous avons mis en place un protocole d'endommagement de la peau par *tape stripping*. Une précédente étude s'est intéressée à l'évolution du module de Young en fonction de la quantité de cornéocytes enlevés par « *tape stripping* » [150]. Elle a montré que le module diminuait en fonction du nombre de rubans adhésifs appliqués sur la peau. Après une application de vingt rubans adhésifs, ils ont constaté une diminution de 45% du module de Young. La mesure de la perte insensible en eau dans la zone altérée a confirmé la présence d'irritation cutanée, visible à travers le doublement de sa valeur après l'application des vingt adhésifs sur la peau.

Protocole

L'étude a été réalisée sur un volontaire homme, caucasien, âgé de 23 ans. Les mesures ont été réalisées sur l'avant-bras droit du volontaire, à 6 cm du coude. Après une période d'acclimatation de 15 minutes, une première série de trois essais avec le dispositif d'indentation sans contact a été réalisée. Ces mesures ont permis de déterminer la valeur initiale de la vitesse de propagation de l'onde et du module de Young pour la peau saine (non altérée).

Nous avons ensuite effectué le protocole d'altération de la peau par « *tape stripping* ». Le ruban adhésif a toujours été appliqué sur la même zone de peau, préalablement repérée. Nous avons

appliqué chaque adhésif pendant 10 s avec une masse de 50 g sur la zone de peau, avant de le retirer avec une vitesse d'environ 20 mm/s.

Une mesure de la vitesse de propagation a été effectuée après chaque série de trois rubans adhésifs appliqués sur la peau. Au total, nous avons utilisé dix-huit rubans adhésifs.

Pour valider la capacité du dispositif à évaluer le degré d'irritation de la peau, nous avons réalisé en parallèle des mesures de perte insensible en eau et de perfusion sanguine. De plus, nous avons pesé la quantité de cornéocytes enlevés après chaque série de trois adhésifs pour estimer l'épaisseur de *stratum corneum* retiré.

Résultats

La Figure 36 présente l'évolution de l'épaisseur de peau enlevée en fonction du nombre de rubans adhésifs appliqués sur la peau. Les résultats montrent que l'épaisseur de *stratum corneum* enlevé augmente de manière non linéaire en fonction du nombre de rubans adhésifs appliqués sur la peau. Plus on utilise de rubans adhésifs, moins on enlève de couches de cornéocytes. Ceci reflète la forte cohésion qu'il existe entre les cornéocytes situés au niveau des couches inférieures du *stratum corneum* [151]. Ce phénomène a déjà été observé dans la littérature [152].

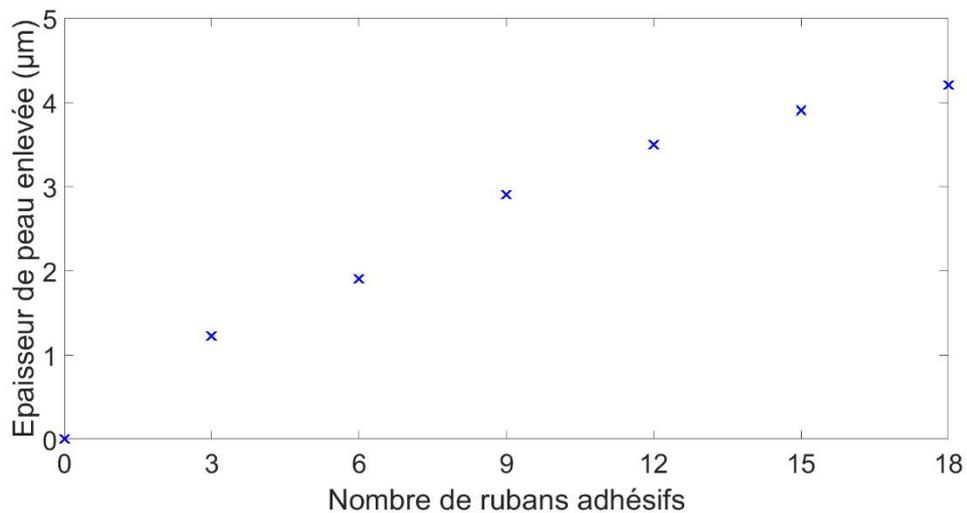


Figure 36 : Evolution de l'épaisseur de peau enlevée en fonction du nombre de rubans adhésifs

L'altération de la peau engendrée a été quantifiée par une mesure de perte insensible en eau et de flux sanguin. Les résultats sont présentés Figure 37. On remarque une augmentation importante de la perte insensible en eau et du flux sanguin en fonction du nombre de rubans adhésifs utilisés.

Pour la perte insensible en eau, après trois adhésifs, on observe une petite diminution de la valeur qui augmente ensuite à partir de six rubans adhésifs appliqués. A la fin du processus d'altération par « tape stripping », la valeur de perte insensible en eau a plus que doublé et atteint une valeur de 12,9 g/(h.m²). De même que pour la perte insensible en eau, le flux sanguin n'augmente pas tout de suite après l'application des premiers rubans adhésifs sur la peau. Il faut attendre un nombre de six adhésifs pour commencer à avoir une réaction du flux sanguin.

L'augmentation de ces deux paramètres biophysiques est corrélée avec la diminution de l'épaisseur du *stratum corneum* et confirme que la peau a été irritée suite à l'altération par « tape stripping ».

Chapitre 3 L'irritation de la peau : observation et méthodes d'évaluation

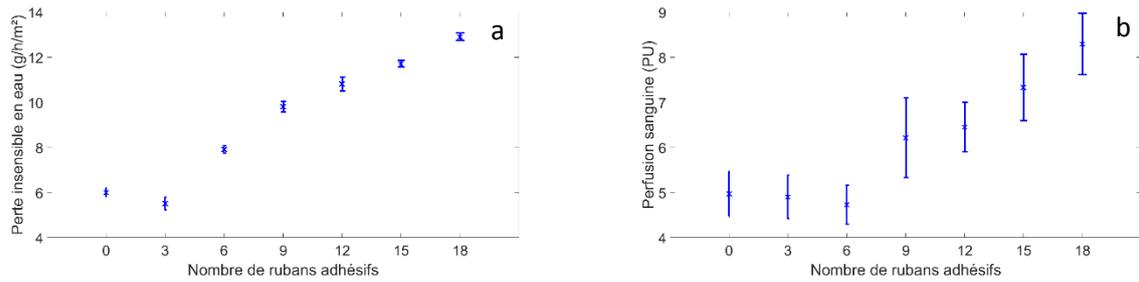


Figure 37 : Evolution de la perte insensible en eau (a) et de la perfusion sanguine (b) en fonction du nombre de rubans adhésifs appliqués sur la zone de peau

On présente sur la Figure 38 les résultats obtenus avec le dispositif d'indentation sans contact, l'objectif étant de voir si on observe une évolution du module de Young de la peau en fonction du nombre de rubans adhésifs utilisés. L'évolution des vitesses de propagation et des modules de Young montre une diminution à partir de trois rubans adhésifs. On remarque cependant une augmentation des valeurs juste après la première série de trois adhésifs. Cette augmentation coïncide avec la diminution des valeurs de flux sanguin et de perte insensible en eau. On peut attribuer ce phénomène au temps que met la peau pour répondre à la sollicitation.

Les résultats démontrent donc la sensibilité du dispositif d'indentation sans contact à l'altération du *stratum corneum*, qui se traduit par une diminution de la vitesse de propagation de 20% et du module de Young d'environ 40%. Ces résultats sont également cohérents avec ceux de la littérature [138].

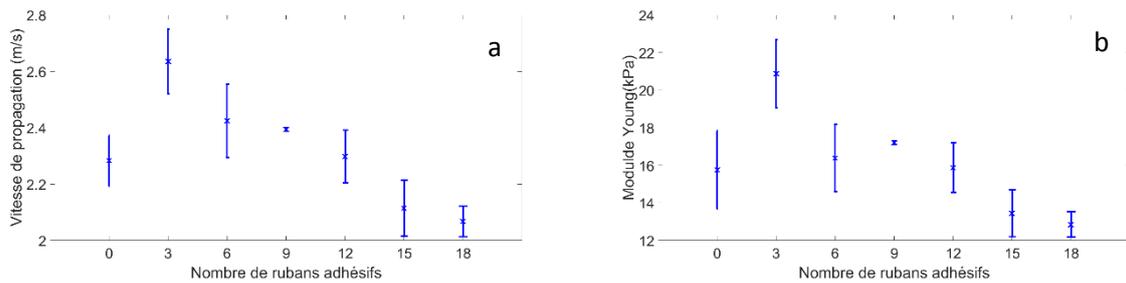


Figure 38 : Evolution de la vitesse de propagation (a) et du module de Young (b) en fonction du nombre de rubans adhésifs appliqués sur la zone de peau

3.4. Conclusion

Le but de ce chapitre était de faire un tour d'horizon des méthodes disponibles pour évaluer l'irritation de la peau, et ainsi choisir lesquelles utiliser dans le cas d'un test de frottement répété avec un papier en cellulose.

Nous nous sommes donc intéressés à l'irritation de la peau et en particulier à ses méthodes d'observation et d'évaluation. Nous avons présenté les différentes méthodes utilisées depuis plusieurs années pour évaluer cliniquement les signes d'irritation de la peau. Celles-ci peuvent être séparées en deux grandes catégories : les méthodes de lectures visuelles et les méthodes de quantification de paramètres biophysiques de la peau. L'inconvénient principal de la lecture visuelle est qu'elle nécessite l'expérience du clinicien. Les méthodes d'évaluation biophysique de l'irritation de la peau telles que la mesure du flux sanguin, de la couleur (érythème), de l'hydratation de la peau et de la perte insensible en eau permettent, quant à elles, d'avoir une évaluation objective et quantitative.

Comme le frottement répété d'un papier en cellulose ou de n'importe quelle surface sur la peau engendre une altération du *stratum corneum*, nous avons développé un dispositif capable de quantifier cette altération. Le dispositif d'indentation sans contact développé permet de déterminer les propriétés mécaniques de la peau sans la toucher. On évite ainsi d'avoir l'effet de l'adhésion dans la quantification des propriétés mécaniques.

Pour valider ce dispositif, nous avons dans un premier temps montré qu'il permettait de retrouver les propriétés mécaniques de la peau en fonction du sexe et de l'âge. En effet, nous avons montré que le module de Young diminuait avec le vieillissement de la peau et qu'il était plus élevé chez les hommes. Dans un second temps, nous avons confirmé que le dispositif était sensible à l'altération du *stratum corneum* par « tape stripping ».

Ainsi, pour évaluer l'irritation de la peau suite à un frottement répété de papiers en cellulose, nous avons choisi de travailler avec les différentes techniques biophysiques et avec le dispositif d'indentation sans contact de manière à avoir une information complète sur l'état de la peau.

Chapitre 4

Tribologie de l'interaction des papiers en cellulose avec la peau

Sommaire

4.1.	Introduction et objectifs.....	66
4.2.	Frottement de textiles sur la peau : état de l'art	73
4.2.1.	Propriétés tribologiques de la peau humaine	73
4.2.1.1.	Effet de l'effort normal.....	73
4.2.1.1.	Effet de la vitesse de frottement	73
4.2.1.2.	Effet de l'humidité de la peau	74
4.2.1.3.	Effet du site anatomique cutané, de l'ethnie, de l'âge et du genre	74
4.2.2.	Frottement de surfaces textiles sur la peau	75
4.3.	Dispositif de frottement <i>in vivo</i> utilisé pour l'étude	75
4.3.1.	Biotribomètre rotatif couplé à un vélocimètre laser	75
4.3.2.	Méthode d'analyse	76
4.4.	Protocole expérimental.....	77
4.4.1.	Panel.....	77
4.4.2.	Echantillons	78
4.4.3.	Paramètres d'essai.....	78
4.5.	Résultats et Discussion	79
4.5.1.	Effet de la force normale	79
4.5.2.	Effet de la vitesse de rotation	81
4.5.3.	Effet de l'âge et du genre	82
4.5.3.1.	Coefficient de frottement.....	82
4.5.3.2.	Niveau vibratoire moyen.....	86
4.5.4.	Effet de la qualité tactile des papiers en cellulose.....	88
4.5.4.1.	Coefficient de frottement.....	88
4.5.4.2.	Niveau vibratoire moyen.....	88
4.6.	Conclusion.....	89

4.1. Introduction et objectifs

La tribologie (du grec *tribein* : frottement et *logos* : étude) est la science qui étudie les interactions entre deux surfaces en contact, immobiles ou animées de mouvements relatifs. Ce terme recouvre, entre autres, tous les domaines du frottement, de l'usure, de l'étude des interfaces et de la lubrification. Le frottement peut être défini comme la force résistante tangentielle à l'interface commune entre deux corps lorsque, sous l'effet d'une force externe, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à la surface de l'autre.

Le comportement tribologique est généralement exprimé par l'intermédiaire du coefficient de frottement, défini comme le rapport de la force tangentielle résistante au mouvement sur la force normale appliquée. En 1699, Amontons est le premier à formaliser des lois empiriques sur le frottement sec. En 1795, Coulomb complète ces lois en introduisant le concept de frottement statique et dynamique. La force de frottement statique représente la force nécessaire pour initier un mouvement alors que la force de frottement dynamique est la force nécessaire pour maintenir ce mouvement. Finalement, en 1950, Bowden et Tabor proposent une nouvelle théorie du frottement. Ils décomposent la force de frottement en deux parties : une partie liée à la déformation et une seconde liée à l'adhésion à l'interface.

Ce chapitre a pour objectif d'étudier les propriétés tribologiques de l'interaction entre la peau humaine et les papiers en cellulose préalablement caractérisés. On s'intéresse notamment à l'effet de l'âge et du genre du volontaire et des conditions de frottement (vitesse et force normale).

4.2. Frottement lubrifié

Le corps présente un film lipidique (ou hydrolipidique) sur toute sa surface dont la fonction première est de le protéger des agressions extérieures. Ce film cutané est l'élément principal des propriétés physico-chimiques de la surface cutanée. Dans le cas d'un problème de frottement entre deux solides, il est établi que la présence d'un film interfacial peut modifier de manière importante le régime de frottement. Dans le cas du frottement frotteur/peau, il est intéressant de s'interroger sur le rôle du film cutané.

Cette partie provient en grande partie du travail de thèse de C. Pailler-Mattei [153].

4.2.1. Cas général

Lors d'un problème de frottement, il est nécessaire d'analyser l'interface entre les deux corps en contact. Lorsqu'un film liquide ou gazeux se situe à l'interface, le régime de frottement peut être de type : sec, limite, mixte, hydrodynamique ou élastohydrodynamique. Dans le cas d'un frottement lubrifié, le contact entre les deux solides est réalisé par l'intermédiaire du lubrifiant. Le régime est dit hydrodynamique. Le coefficient de frottement est alors dépendant de la pression moyenne, de la viscosité, de la vitesse d'entraînement et de l'épaisseur du lubrifiant.

La courbe de Stribeck traduit l'influence du lubrifiant sur le coefficient de frottement. Il s'agit de la variation du coefficient de frottement, μ , en fonction du nombre de Sommerfeld, s (Figure 39).

Pour $0 < s < s_1$, μ varie très rapidement avec s . Les aspérités des solides 1 et 2 sont en contact. Le régime de frottement est sec ou limite.

Pour $s_1 < s < s_2$, le régime est mixte. Il est admis que la portance est assurée en partie par les aspérités en contact.

Pour $s > s_2$, le régime hydrodynamique est atteint. La pression de contact est portée par le fluide.

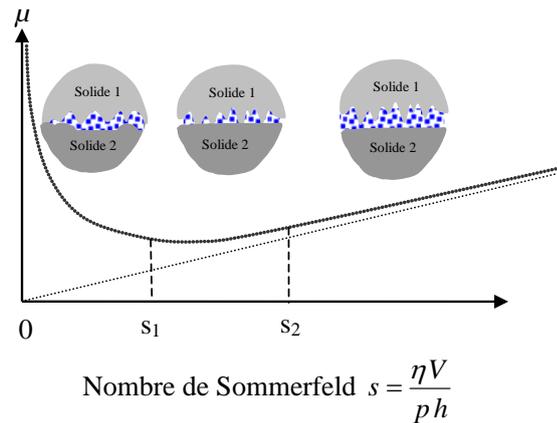


Figure 39 : Courbe de Stribeck délimitant les différents régimes de lubrification, avec η la viscosité du lubrifiant, V la vitesse de glissement entre les deux solides, p la pression moyenne dans le lubrifiant et h l'épaisseur du lubrifiant (Thèse C. Pailler-Mattei, 2004)

D'autres critères permettent de déterminer les différents régimes de lubrification. Ils sont fonction des paramètres topographiques des surfaces en frottement. Le plus utilisé consiste à comparer l'épaisseur du lubrifiant, h et l'écart type des rugosités de la surface frottée Ω :

$$\Lambda = \frac{h}{\Omega}$$

Si $\Lambda > 3$, le régime est hydrodynamique. La lubrification est en film complet, toute la charge est portée par le lubrifiant.

Si $3 > \Lambda > 0,5$, le régime est mixte. Le contact solide/solide est intermittent et une partie de la charge est portée par le lubrifiant.

Si $\Lambda < 0,5$, le régime est dit limite ou sec. Le lubrifiant n'a pas d'effet sur le coefficient de frottement, toute la charge est portée par les aspérités.

Les critères topographiques sont moins pertinents pour évaluer le régime de lubrification que la courbe de Stribeck. Cependant, l'obtention de la courbe de Stribeck nécessite la connaissance de plusieurs paramètres. Dans le cas de la peau *in vivo*, ces paramètres sont difficiles à obtenir.

4.2.2. Application à la peau humaine

Afin de comprendre le rôle du film interfacial dans le frottement cutané, Pailler Mattei [153] a analysé le paramètre Λ sur une peau « normale ». L'écart-type des rugosités moyennes du relief de la peau, Ω (ou SPq), est obtenu à partir d'une topographie de la surface cutanée, réalisée par interférométrie laser (Figure 40).

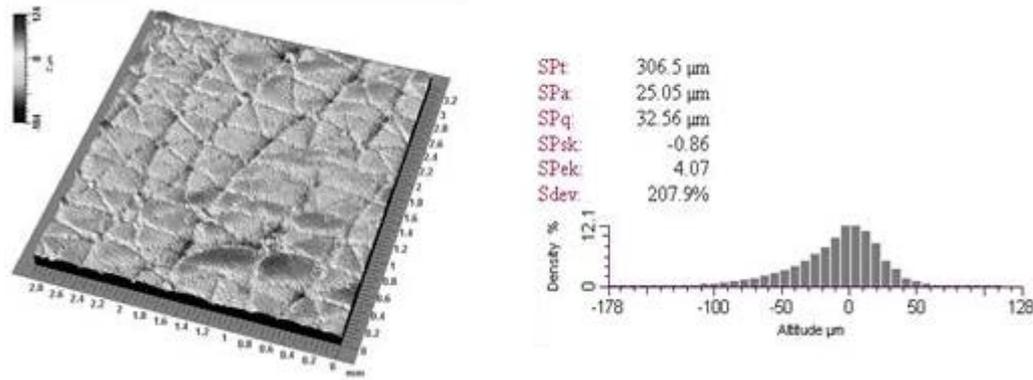


Figure 40 : Vue en 3D de la surface de la peau de l'avant-bras et paramètres topographiques associés

L'épaisseur du film cutané sur la peau de l'avant-bras est comprise entre : $0,5 \mu\text{m} < h < 1 \mu\text{m}$, d'où : $0,015 < \Lambda < 0,03 \ll 0,5$.

Le régime de frottement sur la peau normale est donc limite. La charge est portée par les plateaux cutanés et non par le film lipidique. Cette hypothèse est confortée par le fait que la peau a tendance à se « déplier » lorsqu'une charge est appliquée à sa surface en raison de sa faible raideur [154]. Cependant, la modification de la rugosité de surface cutanée lors de l'application d'un effort ne rend pas toujours pertinente l'utilisation du paramètre Λ dans la définition du régime de frottement.

Pour vérifier l'effet du film lipidique sur le régime de frottement, Paillet-Mattei a réalisé des tests de frottement entre un frotteur sphérique et une peau normale (en présence de film lipidique), puis entre le même frotteur et une peau desséchée (sans film lipidique), pour une charge normale de 20 mN et une vitesse de frottement de 400 $\mu\text{m/s}$. La peau a été desséchée par un lavage à l'acétone et à l'alcool. Il a montré que la force de frottement mesurée était plus faible en l'absence de film. Ainsi, le film cutané ne lubrifie pas le contact lors du frottement et donc le régime de frottement entre la peau et le frotteur peut être considéré comme un régime limite ou sec.

4.3. Théories du frottement sec

4.3.1. Lois de Amontons

On doit la première étude dans le domaine de la tribologie à Léonard de Vinci (1452-1519). Au cours du XV^{ème} siècle, il a mesuré la force de frottement entre des objets et des surfaces soit horizontales soit inclinées. Néanmoins, les premières lois de frottement ont été attribuées à Amontons (1699) :

- 1^{ère} loi de frottement : la force de frottement est indépendante de l'aire apparente de contact
- 2^{ème} loi de frottement : la force de frottement est proportionnelle à la charge normale appliquée
- 3^{ème} loi : la force de frottement est indépendante de la vitesse de glissement

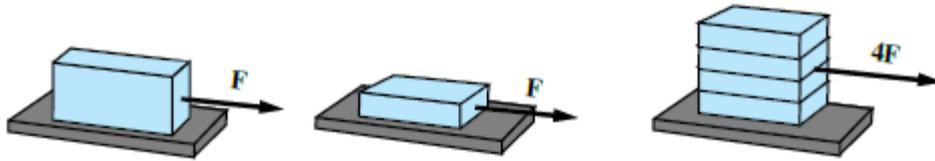


Figure 41 : Lois de Amontons (1699)

4.3.2. Lois de Coulomb

En 1782, Coulomb a complété la 3^{ème} loi de Amontons en introduisant le concept de frottements statique et dynamique. La force de frottement statique correspond à la force nécessaire pour initier le mouvement. Une fois le mouvement en place, on parle de frottement dynamique. La force de frottement statique est généralement plus élevée que la force de frottement dynamique.

Coulomb a observé que la force de frottement dynamique était indépendante de la vitesse de glissement.

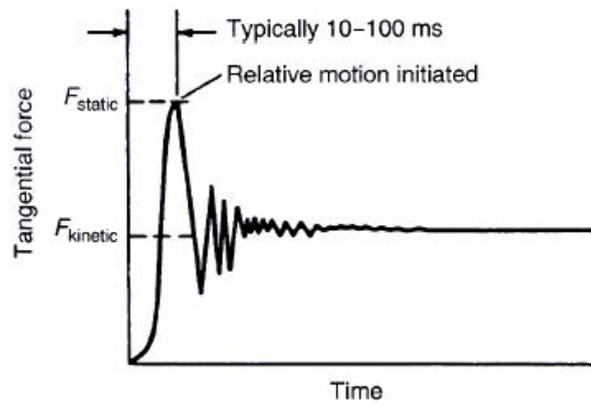


Figure 42 : Forces de frottements statique et dynamique

4.3.3. Modèle de frottement à « deux termes »

Ce modèle est décrit pour un contact entre une surface plane et un frotteur sphérique infiniment rigide par rapport à l'autre surface.

Dans la théorie de Bowden et Tabor [155], la force de frottement peut être considérée comme étant constituée d'une composante due à la rupture de jonctions adhésives entre les aspérités en contact entre la surface et le frotteur (au niveau de la zone interfaciale) et d'une composante due à la déformation de la surface sous l'action du frotteur (au niveau de la zone cohésive) :

$$F_T = F_{int} + F_{def}$$

Où F_T est la force de frottement totale, F_{int} est la force de frottement interfaciale et F_{def} est la force de déformation.

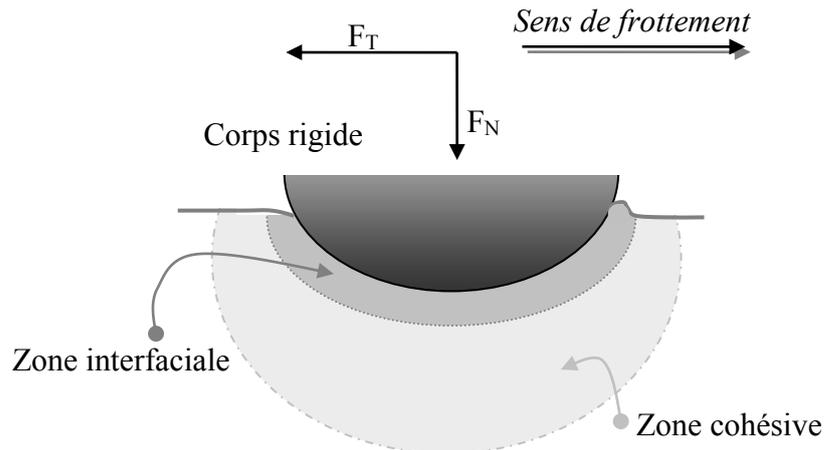


Figure 43 : Schéma des deux sites de dissipation d'énergie lors du frottement sur un polymère. Le premier site est localisé dans la zone interfaciale et correspond à l'adhésion, alors que le second site est situé en profondeur et correspond à la déformation

La composante interfaciale correspond à l'énergie dissipée lors de la rupture des liaisons physico-chimiques (notamment de van der Waals) entre le frotteur et la surface. Elle peut s'exprimer comme le produit entre la contrainte de cisaillement interfaciale τ et l'aire de contact réelle A entre les deux surfaces :

$$F_{int} = \tau \times A$$

L'aire de contact réelle entre deux surfaces rugueuses est en général significativement plus faible que l'aire de contact apparente.

Il a été montré que lorsqu'il y a un film organique entre les deux surfaces antagonistes, la contrainte de cisaillement peut s'écrire comme une fonction linéaire de la pression moyenne dans le contact :

$$\tau = \tau_0 + \alpha \times p$$

Avec τ_0 la contrainte de cisaillement seuil nécessaire à la séparation des deux surfaces sous contrainte nulle, α le coefficient de pression et p la pression moyenne dans le contact.

Ainsi la force de frottement interfaciale correspond à la somme de deux termes : un terme adhésif, $F_{adh} = \tau_0 \times A$, et un terme rendant compte du cisaillement interfacial, $F_{cis} = \alpha \times p \times A$.

La composante de déformation provient des pertes d'énergie dues à la déformation du matériau viscoélastique. Une expression de la force de frottement liée à la déformation a été proposée par Tabor et Greenwood [156] :

$$F_{def} = \beta \left(\frac{9}{128R} \right)^{2/3} \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right)^{1/3} F_N^{4/3}$$

$$\text{et } \beta = \pi \tan \delta$$

Où β est la fraction dissipative, $\tan \delta$ le facteur de perte, E et ν sont respectivement le module de Young et le coefficient de Poisson de la surface déformée, R est le rayon du frotteur sphérique.

Ce modèle repose sur l'hypothèse que les différentes contributions au coefficient de frottement sont découplées. En réalité, il s'agit d'une hypothèse qui met en équation le coefficient de frottement de manière simple car il semble que, concrètement, ces contributions soient généralement couplées [157].

Lorsque l'on s'intéresse au mécanisme de frottement de la peau humaine, on considère généralement que la partie adhésive est prépondérante devant la composante de déformation [158]. Néanmoins, selon certains auteurs, lors du frottement de la peau contre des textiles, la composante de déformation n'est pas négligeable [159].

4.3.4. Aire de contact

L'estimation de l'aire de contact réelle est une des difficultés majeures des tests de frottement. Elle dépend essentiellement de la topographie des surfaces et du comportement mécanique des solides en contact, en particulier de leur rhéologie.

4.3.4.1. Définition de l'aire de contact

Un essai de frottement est réalisé entre une sphère de rayon R , et une surface plane élastique. La projection de l'aire de contact entre l'indenteur et le matériau dans le plan tangent à la surface du matériau est définie comme l'aire normale, A_N . La projection de l'aire de contact indenteur/matériau dans le plan normal à la surface du matériau est notée A_T , aire de contact tangentielle (Figure 44).

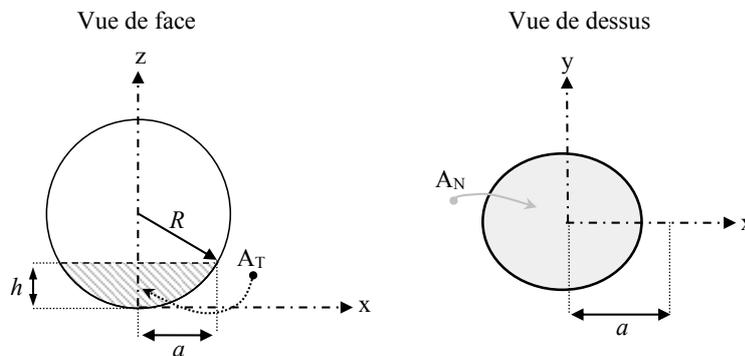


Figure 44 : Vue en coupe des aires de contact lors d'un essai de frottement avec un frotteur sphérique de rayon R . A_N est la projection de l'aire de contact dans le plan horizontal et A_T est la projection de l'aire de contact dans le plan vertical, a est le rayon de contact et h la profondeur d'enfoncement

Pour un enfoncement h et un rayon de contact a , le calcul de A_T donne : $A_T = \frac{2 \times a^3}{3 \times R}$. Le calcul de A_N dépend de la nature du matériau.

Pour un matériau élastique

L'aire normale de contact, A_N , est définie par : $A_N = \pi a^2$

Le rapport, $\frac{A_T}{A_N}$, vaut : $\frac{A_T}{A_N} = \frac{2}{3\pi} \frac{a}{R}$

Dans le cas d'un contact purement élastique et pour des faibles enfoncements, le rapport des aires, $\frac{A_T}{A_N}$, ne dépend que de la déformation, ε ($\varepsilon \propto \frac{a}{R}$ pour un contact sphère/plan).

Pour un matériau viscoélastique

Lorsqu'un frotteur sphérique (infiniment rigide) glisse sur la surface plane d'un substrat viscoélastique, l'aire de contact entre les deux surfaces présente une dissymétrie liée à la viscosité du substrat. Cette aire de contact peut être décomposée en deux parties comme le montre la Figure 45 : A_{Nav} correspondant à l'aire située sous la face avant du frotteur et l'aire A_{Nar} correspondant à l'aire située sous la face arrière du frotteur. Cette dernière évolue en fonction des propriétés viscoélastiques du substrat, de la charge appliquée et de la vitesse de glissement.

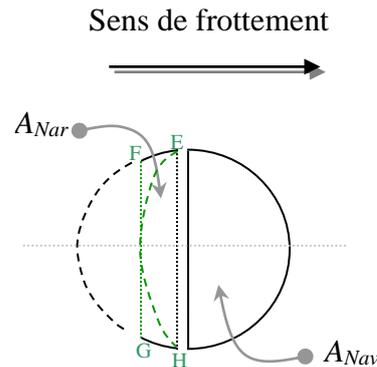


Figure 45 : Aire de contact entre un frotteur rigide et un matériau viscoélastique. La déformation élastique est maximum à l'équateur. De part et d'autre de celui-ci, elle est égale ou inférieure à la valeur sur l'équateur.

Le rapport des aires, $\frac{A_{Nar}}{A_{Nav}}$, est représentatif de la nature de la réponse du contact :

- si $\frac{A_{Nar}}{A_{Nav}} \rightarrow 1$, le contact symétrique est de nature élastique.
- si $\frac{A_{Nar}}{A_{Nav}} < 1$, le contact est influencé par la nature viscoélastique du substrat.

L'estimation rigoureuse de l'aire de contact arrière, A_{Nar} , est délicate. La meilleure méthode est une méthode optique [160]. Il existe cependant un modèle théorique tenant compte de l'aspect viscoélastique du matériau dans l'évolution du rapport $\frac{A_{Nar}}{A_{Nav}}$. Ce rapport est relié au facteur de perte du matériau :

$$\frac{A_{Nar}}{A_{Nav}} = \sqrt{1 + \tan^2 \delta} - \tan \delta \quad \text{où } \tan \delta \text{ est le facteur de perte.}$$

Dans le cas d'un contact viscoélastique et pour des faibles enfoncements, l'aire normale de contact vaut alors :

$$A_N = A_{Nav} + A_{Nar} = A_{Nav} \left(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta} - \tan \delta \right) = \frac{\pi a^2}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta} - \tan \delta \right)$$

Le rapport, $\frac{A_T}{A_N}$, est alors égal à :

$$\frac{A_T}{A_N} = \frac{4}{3\pi} \frac{a}{R} \left(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta} - \tan \delta \right)$$

Dans le cas d'un matériau parfaitement élastique, le facteur de perte est égal à zéro et le rapport $\frac{A_{Nar}}{A_{Nav}} = 1$: le contact est parfaitement symétrique.

4.4. Frottement de textiles sur la peau : état de l'art

4.4.1. Propriétés tribologiques de la peau humaine

L'étude des propriétés tribologiques de la peau est depuis plusieurs années un sujet de recherche qui intéresse de nombreux scientifiques. Ces études concernent en particulier le domaine des cosmétiques [161]–[164] et de la dermatologie, les lésions cutanées ou encore les prothèses [165]–[169]. La connaissance du comportement tribologique de la peau est un prérequis essentiel pour le développement de nouvelles surfaces qui sont en contact avec celle-ci, en particulier dans le domaine médical [169], dans le domaine des textiles [170], [171] ou encore pour des applications sportives [172].

Le coefficient de frottement de la peau est largement influencé par les propriétés de la peau elle-même (hydratation, âge, genre), les propriétés du matériau en contact, éventuellement la couche à l'interface entre la peau et le matériau (sébum naturellement sécrété, produits cosmétiques, eau...), et les paramètres de contact (effort normal appliqué, vitesse de frottement).

4.4.1.1. Effet de l'effort normal

La loi de Amonton stipule l'invariance du coefficient de frottement en fonction de l'effort normal. Naylor a rapporté que pour un effort normal allant de 2 à 7 N, le coefficient de frottement de polythène sur la peau du tibia restait constant à 0,5 [173].

Cependant, de récents travaux suggèrent que la loi de Amonton n'est pas applicable aux matériaux viscoélastiques tels que la peau. El-Shimi a mesuré la dépendance du coefficient vis-à-vis de l'effort normal appliqué en utilisant un frotteur en acier en contact avec le bras [174]. Il a montré que le coefficient de frottement diminuait avec une augmentation de l'effort normal. Sivamani *et al.* [175] ont montré que le coefficient de frottement était proportionnel à $F_N^{-0,32}$, où F_N est l'effort normal appliqué. Koudine *et al.* ont trouvé un exposant égal à -0,28 [154].

Cottenden s'est intéressé au frottement de la peau de l'avant-bras contre des textiles non tissés [176]. Il a réalisé cette étude sur un panel de cinq femmes âgées de 18 à 44 ans en conditions normales et en conditions d'humidité exagérée. Il a montré que le coefficient de frottement respectait la loi de Amonton et donc restait constant quelque-soit l'effort normal appliqué.

4.4.1.1. Effet de la vitesse de frottement

Peu d'études ont étudié l'influence de la vitesse de glissement ou de rotation du frotteur sur le coefficient de frottement de la peau [177], [178].

Tang *et al.* ont étudié le frottement entre la peau et une sonde en polypropylène. Ils ont rapporté qu'une augmentation de la vitesse de frottement de 0,5 à 4 mm/s induisait une augmentation du coefficient de frottement de 0,39 à 0,52 [178]. Zhang et Mak ont quant à eux, étudié le frottement de différents matériaux contre la peau : aluminium, nylon, silicone et coton. Ils ont également remarqué une légère augmentation du coefficient de frottement correspondant à une élévation de la vitesse de rotation du frotteur de 25 tr/min à 63 tr/min [177].

Au contraire, Adams *et al.* n'ont observé aucun changement du coefficient de frottement en augmentant la vitesse de rotation du frotteur en acier [158].

Dans leur étude, Johnson *et al.* ont décrit l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse (de 0,25 à 33 mm/s) en utilisant une loi puissance [179].

4.4.1.2. Effet de l'humidité de la peau

Le *stratum corneum* peut absorber jusqu'à 8 fois son poids en eau. Le niveau d'hydratation de la peau est connu pour influencer le frottement à sa surface [180]. En effet, le coefficient de frottement de la peau peut varier entre 1,5 et 7 suivant que l'on soit en condition sèche ou humide [161], [165], [181]–[183]. L'écart important qu'il existe entre les différentes valeurs de coefficients de frottement mesurés est, entre autres, dû à la diversité des méthodes de mesures employées.

Gerhardt *et al.* ont fait varier le niveau d'hydratation de la peau de l'avant-bras de 22 sujets et ont trouvé une corrélation linéaire positive entre le taux d'hydratation cutanée et le coefficient de frottement contre des textiles [184]. De plus, ils ont montré que le frottement sur la peau des femmes était plus sensible aux variations d'hydratation. En effet, ils ont démontré que le coefficient de frottement augmentait de 26% chez les hommes et de 43% chez les femmes lorsque l'on passait d'une peau sèche à une peau normalement hydratée. Des résultats similaires ont été trouvés lorsque la peau était en contact avec des frotteurs métalliques ou polymériques [185]–[187].

Adams *et al.* ont mesuré le coefficient de frottement de la peau en contact avec une sonde sphérique en polypropylène, dans des conditions d'humidité différentes [158]. Ils ont montré que l'ajout d'eau entraînait une augmentation du coefficient de frottement jusqu'à une valeur limite correspondant au moment où la peau est complètement saturée en eau. Ils ont attribué cet effet au ramollissement de la peau dû à une chute de son module de Young après hydratation. Ce ramollissement serait à l'origine d'une augmentation de l'aire de contact entre le frotteur et la peau donc augmenterait la partie adhésive du frottement.

Gwosdow *et al.* ont frotté des textiles sur la peau dans différentes conditions d'humidité : conditions « normales », environnement chaud et sec, et environnement chaud et humide [188]. Pour eux, une humidité plus importante augmente l'hydratation du *stratum corneum*, ce qui engendre une adhésion plus importante entre le textile et la peau. Cette adhésion plus élevée engendre une aire de contact peau/textile plus importante et donc un coefficient de frottement plus élevé.

Nacht *et al.* ont observé que suite à l'ajout d'une goutte d'eau sur la peau, le coefficient de frottement augmentait pour revenir ensuite à sa valeur initiale. Ils ont expliqué ce phénomène par l'absorption de l'eau par le *stratum corneum*, induisant ainsi une augmentation de l'air de contact entre la sonde et la peau et augmentant le frottement. Après évaporation de l'eau, le *stratum corneum* revient à son état initial tout comme le coefficient de frottement.

4.4.1.3. Effet du site anatomique cutané, de l'ethnie, de l'âge et du genre

En 1990, Elsner *et al.* [189] ont étudié les propriétés tribologiques de la peau humaine de 44 femmes. Ils ont mesuré le coefficient de frottement de la peau avec une sonde en Téflon. Leurs résultats ont montré que le coefficient de frottement n'était pas le même suivant le site cutané et l'âge du volontaire. Ils ont montré en particulier que le coefficient de frottement était plus élevé pour les zones de peau très hydratées.

Cua *et al.* ont aussi mesuré le coefficient de frottement dynamique de la peau de 29 volontaires, pour onze régions anatomiques : le front, l'abdomen, le haut du bras, l'avant-bras (intérieur et extérieur), derrière l'oreille, la paume de main, le haut et le bas du dos, la jambe et la hanche. Leurs résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence de coefficients de frottement dynamique en fonction du genre et de l'âge des volontaires. Par contre, le coefficient de frottement variait largement entre les différents sites cutanés [187], [190].

Zhang et Mak [191] ont également montré que la région anatomique avait un effet sur le coefficient de frottement dynamique mesuré : il est plus élevé pour la paume de la main.

Sivamani *et al.* n'ont trouvé aucune différence significative du coefficient de frottement de l'avant-bras ni en fonction de l'ethnie ni en fonction du genre et de l'âge [161].

D'autres auteurs ont étudié l'effet de la ménopause sur les coefficients de frottement de la peau. Ils ont trouvé des coefficients de frottement plus élevés pour l'avant-bras de femmes non ménopausées [189], [192]. L'effet de l'âge et du genre sur le coefficient de frottement de la peau du

canthus a également été rapporté pour une population chinoise [183]. Dans cette étude, les auteurs ont trouvé des coefficients de frottement moins élevés chez les hommes que chez les femmes de la tranche d'âge 31-40 ans. Ils attribuent cet effet aux taux d'œstrogènes qui sont beaucoup plus élevés chez les femmes dans cette gamme d'âges.

4.4.2. Frottement de surfaces textiles sur la peau

On considère les textiles comme des matériaux mous possédant une rugosité de surface et un comportement mécanique complexe [193]. Le frottement des textiles contre la peau dépend des paramètres intrinsèques au textile tels que la matière de la fibre, sa morphologie, la structure de surface (tricot, tissé, non-tissé...) et la finition. En particulier, le rôle de la microstructure du textile due notamment à la pilosité des fibres a été mis en évidence dans différentes études [177], [194]–[197]. Des différences importantes de coefficient de frottement ont notamment été observées entre des textiles contenant des fibres naturelles (laine, coton) et des textiles synthétiques (polyamide). En effet, à cause de leur pilosité, les textiles naturels engendrent un coefficient de frottement plus important que les textiles synthétiques [198]. De plus, les ondulations (ou crêpages) et les boucles à la surface de certains textiles peuvent augmenter la résistance au mouvement, menant ainsi à un coefficient de frottement plus élevé [195].

Les dispositifs de frottement de textiles contre la peau sont assez divers. En général, le test consiste simplement à tirer une bande de textile sur la peau d'un volontaire *in vivo*. A l'extrémité libre du textile, on suspend une masse et on enregistre la force de frottement nécessaire pour tirer le textile sur la surface de la peau [188], [199]. Dans d'autres cas, le textile est fixé sur un plateau et c'est la peau qui fait l'action de frotter le textile. Les efforts normal et tangentiel sont mesurés via des capteurs de forces et on en déduit le coefficient de frottement [200]. Depuis quelques années, une nouvelle approche consiste à développer des tribomètres dont le frotteur peut être recouvert de différentes surfaces textiles qui viennent ensuite frotter la peau [201].

4.5. Dispositif de frottement *in vivo* utilisé pour l'étude

4.5.1. Biotribomètre rotatif couplé à un vélocimètre laser

Un tribomètre rotatif *in vivo* a spécialement été conçu au laboratoire pour réaliser des tests de frottement sur la peau *in vivo* [202]. L'objectif principal de ce dispositif est de pouvoir contrôler les propriétés de frottement du papier en cellulose sur la peau.

Le dispositif employé est décrit sur la Figure 46. Il comprend un frotteur en plastique sphérique avec un rayon de 20 mm, dont le mouvement rotatif est généré par un moteur à courant continu. Pour éviter des problèmes d'encombrement, le frotteur est en réalité une tranche de sphère de rayon 20mm qui permet d'avoir un contact local au niveau de la surface de peau. Le moteur est lui-même contrôlé en vitesse de rotation par un régulateur PID de puissance. Ce régulateur permet de corriger l'écart potentiel existant entre une consigne (la vitesse indiquée par l'utilisateur) et sa valeur mesurée par l'intermédiaire de trois paramètres (gain Proportionnel, gain Intégral, gain Dérivé), lesquels vont accélérer, retarder ou stabiliser cette correction. Le moteur peut travailler dans un intervalle de vitesses allant de 0 jusqu'à 350 tr/min. Les mesures d'effort normal et tangentiel sont effectuées par des jauges de contraintes permettant de mesurer un effort jusqu'à 10 N avec une précision de 0,001N.

La bande de papier en cellulose testé est directement fixée sur la surface du frotteur avant chaque essai. Cette bande de papier est normalisée et mesure 50x10 mm².

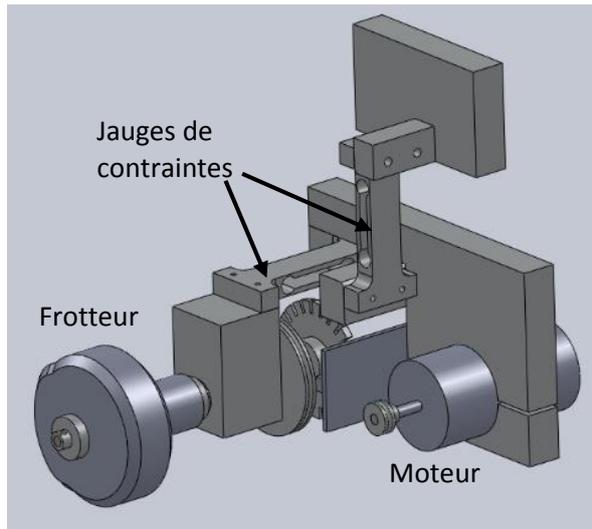
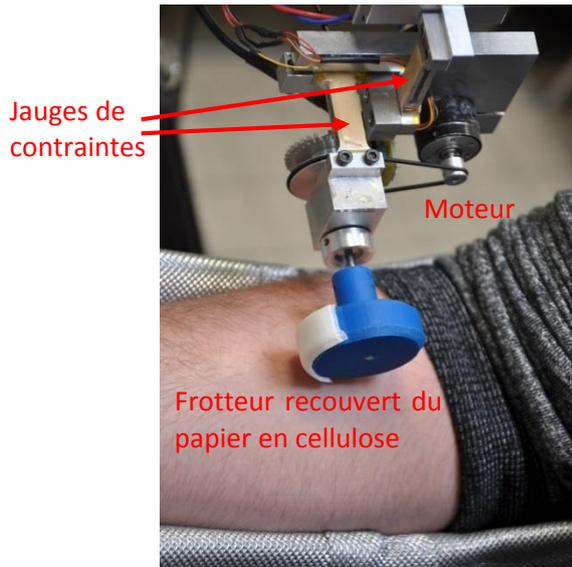


Figure 46 : Biotribomètre rotatif in vivo

Lors du frottement du papier en cellulose sur la peau, une onde de frottement est induite à la surface de la peau. L'originalité de ce dispositif réside dans le couplage du biotribomètre à un vélocimètre laser pour quantifier l'onde de frottement induite. Le vélocimètre laser a un diamètre de spot de 120 μm et une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz. Il mesure la vitesse de vibration de la peau.

L'ensemble du dispositif est contrôlé par un programme implémenté sous LabView qui permet de gérer le moteur (vitesse, nombre de cycles de rotation), de contrôler la force normale appliquée sur la peau et d'enregistrer les efforts normal et tangentiel et les vibrations induites pendant le test de frottement.

4.5.2. Méthode d'analyse

La Figure 47 représente un exemple typique de courbes d'efforts lissées obtenues pour un test de frottement avec le tribomètre rotatif. Nous avons utilisé une technique de moyenne glissante pour le lissage des courbes initialement bruitées [203]. La courbe bleue représente la force normale appliquée sur la peau et la rouge représente la force tangentielle mesurée. Chaque créneau correspond à un cycle de rotation du frotteur. Le maximum est atteint lorsque le papier en cellulose est en contact avec la peau et le minimum lorsqu'il n'y a pas de contact. On réalise ensuite un découpage du signal pour ne garder que les parties correspondant au contact peau/papier en cellulose. A partir des signaux d'efforts obtenus, on estime le coefficient de frottement du contact μ tel que :

$$\mu = \frac{F_X}{F_Z}$$

où F_X est la force tangentielle mesurée et F_Z la force normale appliquée.

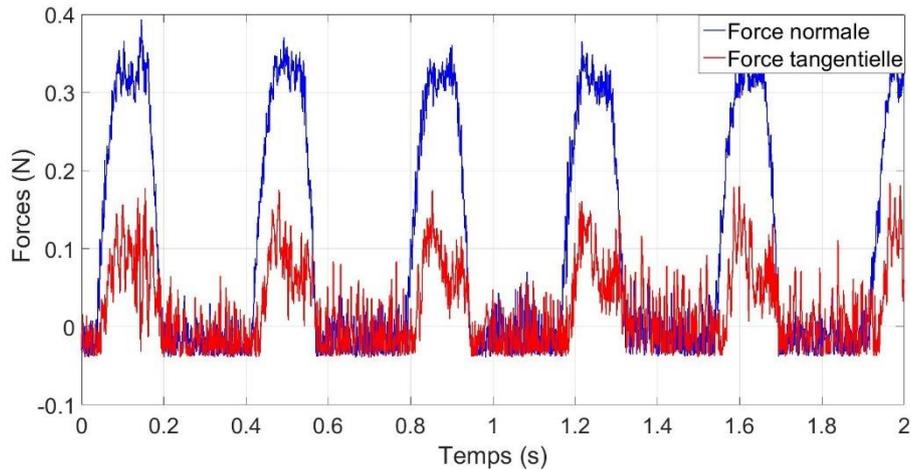


Figure 47 : Courbe des efforts typiquement obtenus pour un test de frottement avec le tribomètre rotatif

La Figure 48 représente un exemple de vibrations obtenues pour un test de frottement avec le tribomètre rotatif. Comme pour les signaux d'efforts, on ne conserve que les parties correspondant au contact peau/papier en cellulose. A partir du signal vibratoire obtenu, on calcule le niveau vibratoire moyen L_v tel que :

$$L_v = 20 \times \log\left(\frac{v_{RMS}}{v_{réf}}\right)$$

Où v_{RMS} est la valeur efficace de la vitesse de vibrations et $v_{réf} = 10^{-9}$ m/s, la plus petite valeur de vitesse mesurable.

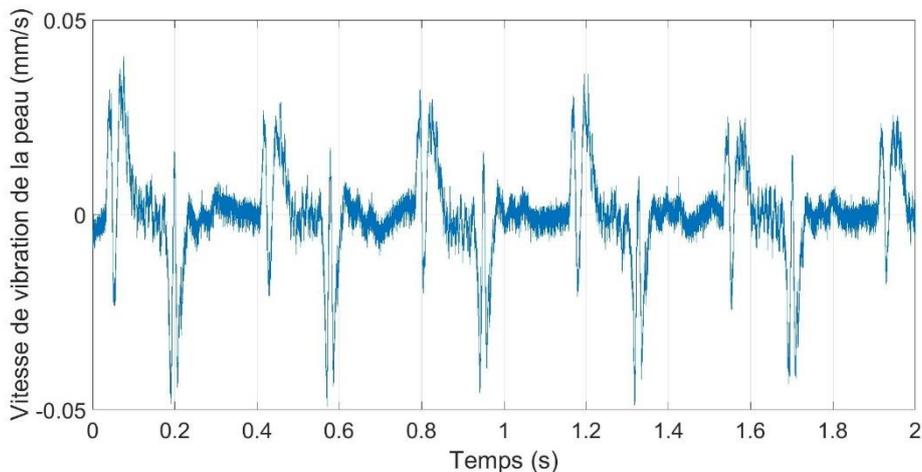


Figure 48 : Vibrations typiquement obtenues pour un test de frottement avec le tribomètre rotatif

4.6. Protocole expérimental

4.6.1. Panel

Le panel de volontaires est le même que celui pour l'étude présentée dans le chapitre 3 (voir Tableau 5).

Tout d'abord, nous avons demandé au volontaire de ne pas utiliser de crème sur la zone de mesure 24h avant le test. Dans le cas de présence de poils dans la zone de peau utilisée pour la mesure, nous avons rasé la zone 24h avant le test.

Avant chaque série de mesures, le volontaire a respecté une période d'acclimatation de dix minutes minimum dans la salle de mesures, dont la température et l'humidité ont été fixées

respectivement à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et $55 \pm 5\%$. Toutes les mesures ont été réalisées sur la face interne de l'avant-bras droit des sujets, à 6 cm du coude.

Les essais *in vivo* pose le problème de l'immobilité du sujet lors de la mesure. En effet, tout mouvement du sujet va changer la force normale appliquée sur la peau. Pour éviter au maximum les mouvements du sujet au cours de l'essai, le volontaire est installé dans un fauteuil et son bras est maintenu par un dispositif de « repose-bras » (Figure 49).

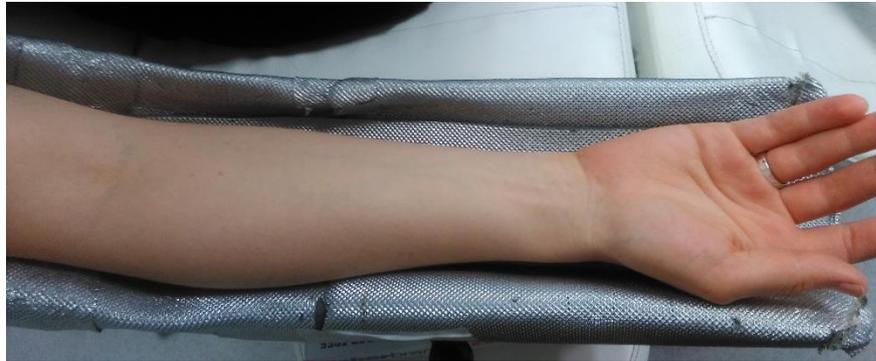


Figure 49 : Dispositif de "repose-bras"

Avant toute mesure, nous avons mesuré le taux d'hydratation de la peau car il a été montré que le frottement était très dépendant de ce paramètre [179], [181], [187], [197]. Pour cela, nous avons utilisé un cornéomètre et réalisé trois mesures dans la zone de peau. La valeur d'hydratation retenue correspond à la moyenne des trois mesures.

4.6.2. Echantillons

Les échantillons sont les six feuilles de papier en cellulose préalablement étudiées dans le chapitre 2. Des bandes de papier de 40 mm par 10 mm ont été découpées, le plus grand côté correspondant au sens marche. Les bandes sont ensuite fixées sur le frotteur avec un scotch double face.

4.6.3. Paramètres d'essai

Différentes conditions de sollicitations (effets de la vitesse de rotation du frotteur et de la force normale appliquée) ont été testées pour observer leurs effets sur le comportement tribologique de l'interface papiers/peau. En raison du grand nombre d'essais à effectuer, ces différentes conditions ont été testées seulement pour le groupe de femmes entre 20 et 29 ans. Ces conditions sont présentées dans le Tableau 6. Pour chaque test, le nombre de cycles de rotation a été fixé à 15.

Pour l'ensemble des volontaires (autre que les femmes entre 20 et 29 ans), la force normale a été fixée à 0,3 N et la vitesse de rotation à 56 mm/s pour se rapprocher au plus près des conditions réelles d'utilisation estimées au sein des laboratoires de SCA.

Tableau 6: Conditions de frottement utilisées pour les tests *in vivo* réalisés avec le tribomètre rotatif

		Force normale appliquée (N)	
		0,3	0,5
Vitesse de rotation (mm/s)	56	✓	✓
	67	✓	
	78	✓	
	90	✓	

4.7. Résultats et Discussion

Pour chaque volontaire, le niveau d'hydratation de la zone de peau considérée dans l'étude a été mesuré. On trouve une valeur comprise entre 30 et 42 pour tous les volontaires, soit une valeur correspondant à une peau sèche à normale selon Heinrich *et al.* [204]. Gerhardt a montré que le coefficient de frottement dépendait du niveau d'hydratation de la peau [184]. En se restreignant à une gamme d'hydratation 30-42, on limite ainsi ses effets sur le coefficient de frottement mesuré.

4.7.1. Effet de la force normale

La Figure 50 présente les valeurs de coefficients de frottement obtenus pour chaque papier en cellulose en fonction de la force normale appliquée sur la peau. On observe aucune différence significative ($p=0,92$) entre les valeurs obtenues pour les deux forces normales appliquées. Ces résultats sont en accord avec ceux d'études précédentes qui stipulent l'invariance du coefficient de frottement en fonction de la pression appliquée sur la peau [171], [205], [206]. Cottenden *et al.* ont étudié l'évolution du coefficient de frottement entre la peau de l'avant-bras et des textiles non-tissés [171]. Ils ont montré que pour des pressions appliquées comprises entre 0,1 et 8,2 kPa, les résultats étaient en accord avec la loi de Amonton. Autrement dit, le coefficient de frottement restait invariant en fonction de la pression appliquée. De même, Kondo [205] et Egawa *et al.* [206] n'ont constaté aucune dépendance du coefficient de frottement peau/textile, vis-à-vis de la pression appliquée dans une gamme allant respectivement, de 0,5 à 5 kPa et de 2,5 à 5 kPa.

Comme la plupart des études s'intéressent à l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la pression apparente de contact entre la peau et le frotteur, il est utile de convertir notre force normale appliquée en pression de contact. Pour cela, nous utilisons le modèle de Hertz pour un contact élastique (petites déformations de la surface) entre une sphère de rayon R (le frotteur) et une surface plane semi-infinie (la peau). Le modèle de Hertz permet d'écrire la relation entre les paramètres géométriques du contact (R le rayon de la sphère, a le rayon de la zone circulaire de contact), la force normale F_Z et le module d'élasticité équivalent du système {sphère-plan} E_c [180] :

$$a = \left(\frac{3RF_Z}{4E_c} \right)^{1/3} ;$$

$$E_c = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \sim \frac{E_{peau}}{1 - \nu_{peau}^2}$$

Le module d'élasticité du système {sphère-plan} est donné par les modules d'élasticité $E_{1,2}$ et les coefficients de Poisson $\nu_{1,2}$ des deux matériaux en contact. Dans le cas de la peau qui est plus « molle » que le frotteur en plastique, on peut approximer E_c par les propriétés mécaniques du matériau le plus mou. Pour calculer une pression de contact moyenne entre la peau de l'avant-bras et le frotteur, pour l'ensemble des volontaires, nous avons utilisé un module de Young moyen de 10 kPa (obtenu dans le chapitre 3) et un coefficient de Poisson de 0,5 (on considère la peau comme un matériau quasi-incompressible) [180]. On obtient ainsi la pression apparente de contact P entre la peau et le frotteur définie par :

$$P = \frac{F_Z}{\pi a^2}$$

Dans nos conditions d'études, nous trouvons ainsi des pressions apparentes moyennes de contact de 2,5 et 3,1 kPa respectivement pour une force normale de 0,3 et 0,5 N. Nous nous trouvons donc dans les gammes de pressions décrites dans les études antérieures et nos résultats concordent avec celles-ci. Les coefficients de frottement mesurés ne sont donc pas sensibles à l'effort normal dans la gamme d'efforts étudiés : ils suivent les lois de Amontons-Coulomb. Cependant, ce résultat ne peut

être généralisé à tous les efforts normaux en raison de la faible gamme d'efforts utilisés dans cette étude.

Nos résultats sont en contradiction avec ceux de Sivamani [175] et Koudine [154] qui ont rapporté une diminution de coefficient de frottement avec la pression appliquée. Cependant, contrairement aux autres études citées, Sivamani et Koudine n'ont pas utilisé de textiles comme source de frottement, mais un frotteur en acier pour Sivamani et en verre pour Koudine.

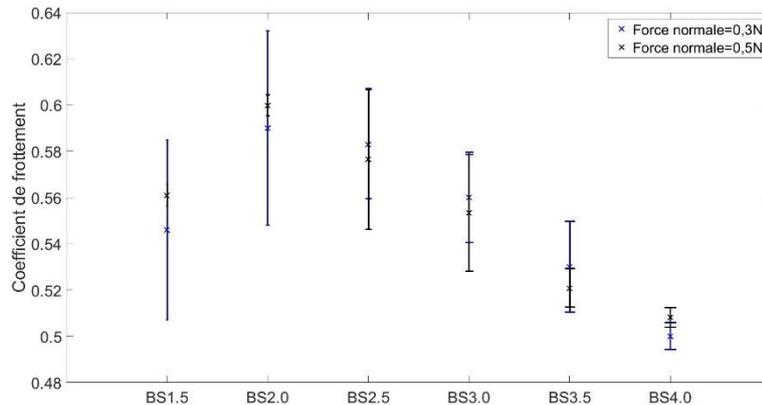


Figure 50 : Effet de la force normale appliquée sur le coefficient de frottement mesuré pour chaque papier en cellulose, pour le groupe de femmes entre 20 et 29 ans

La Figure 51 représente les valeurs de niveaux vibratoires moyens obtenus pour chaque papier en cellulose en fonction de la force normale appliquée sur la peau. On observe une différence significative entre les valeurs obtenues pour les deux forces normales appliquées. En effet, en augmentant la force normale de 0,3 à 0,5 N, on augmente le niveau vibratoire moyen d'environ 3 dB. Les vibrations générées ont donc une amplitude plus importante lorsque l'on augmente la force normale.

Peu d'études se sont intéressées à l'évaluation des vibrations générées lors du frottement de la peau. Ding *et al.* ont étudié la perception tactile de la peau de porc en quantifiant les vibrations induites lors du frottement avec un accéléromètre [207]. Ils ont également étudié l'effet de la force normale appliquée dans une gamme allant de 50 mN à 200mN. Leurs résultats ont montré que, dans le cas d'une peau non traitée, une augmentation de la force normale appliquée sur la peau induisait une augmentation de l'amplitude des pics de vibrations, à l'origine d'une perception plus rugueuse du contact. Nos résultats sont en accord avec cette étude. Une augmentation de la force normale serait à l'origine d'une perception moins agréable du papier en cellulose.

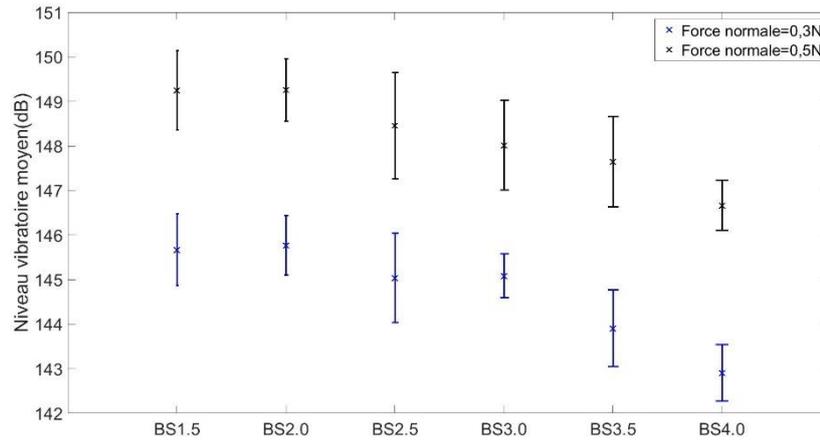


Figure 51 : Effet de la force normale appliquée sur le niveau vibratoire moyen pour chaque papier en cellulose, pour le groupe de femmes entre 20 et 29 ans

4.7.2. Effet de la vitesse de rotation

La Figure 52 présente les coefficients de frottement obtenus pour différentes vitesses de rotation du tribomètre rotatif. On remarque qu'augmenter la vitesse de rotation du frotteur a pour effet d'augmenter le coefficient de frottement entre le papier en cellulose et la peau. En variant la vitesse de 56 à 90 mm/s, le coefficient de frottement augmente en moyenne de 25%.

L'effet de la vitesse de glissement ou de rotation sur le coefficient de frottement a déjà été étudié dans la littérature [177], [178], [182]. Néanmoins, le mécanisme physique exact à l'origine de l'augmentation du coefficient de frottement avec la vitesse n'a pour le moment pas été expliqué et reste à découvrir. On pense que c'est en partie lié au temps d'interaction entre la peau et le frotteur, au temps de relaxation de la peau et à ses propriétés viscoélastiques. Tang a avancé une autre hypothèse dans son étude [178]. Lors du frottement, lorsque le frotteur appuie sur la surface de la peau, celle-ci se déforme et de l'énergie de frottement est dissipée. Lorsque la vitesse de rotation est faible, la peau a le temps de revenir à son état initial (avant déformation) entre chaque cycle de frottement. De ce fait, seule une petite partie de l'énergie de frottement n'est pas restituée. Par contre, si on augmente la vitesse de rotation, la peau n'a plus le temps de revenir complètement à son état initial. L'énergie de frottement perdue est plus importante. Ce qui expliquerait une augmentation du coefficient de frottement avec la vitesse de rotation.

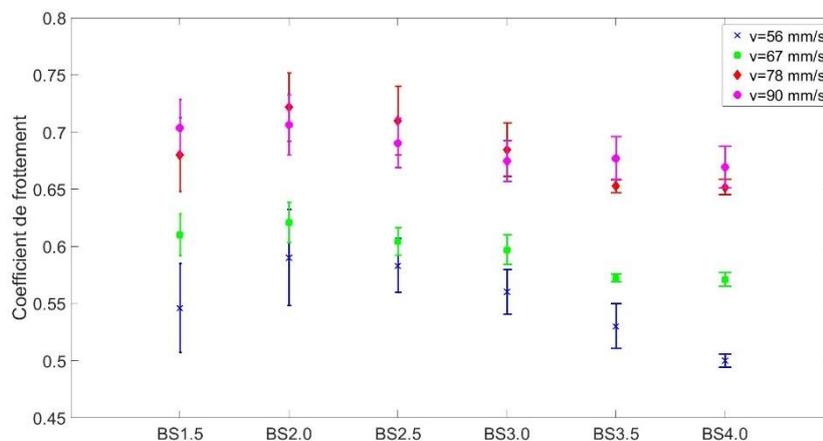


Figure 52 : Effet de la vitesse de rotation sur le coefficient de frottement mesuré pour chaque papier en cellulose

La Figure 53 présente les niveaux vibratoires moyens obtenus pour les différentes vitesses de rotation du frotteur sur la peau. Globalement, on observe une augmentation importante du niveau vibratoire moyen en fonction de la vitesse de rotation du frotteur sur la peau (jusqu'à +6 dB entre les niveaux vibratoires moyens obtenus pour les deux vitesses extrêmes). On remarque également que pour la vitesse la plus élevée, la discrimination entre les différents papiers en cellulose est moins bonne, notamment pour les papiers les plus doux, de la BS2,5 à la BS4,0.

L'augmentation du niveau vibratoire moyen en fonction de la vitesse de frottement a été observée [139]. Djaghloul a étudié l'effet de la vitesse de frottement du doigt humain sur trois surfaces textiles. Il a fait varier la vitesse de 10 à 50 mm/s. Ces résultats montrent une augmentation du niveau vibratoire jusqu'à 9 dB pour l'un des textiles. Nos résultats sont conformes avec ceux de l'étude de Djaghloul.

Dans le chapitre 2, nous avons vu que plus le niveau vibratoire était élevé, moins le papier en cellulose était perçu doux. En faisant l'analogie, on peut avancer que l'augmentation de la vitesse de rotation induit un inconfort pour la peau, le papier étant perçu moins doux.

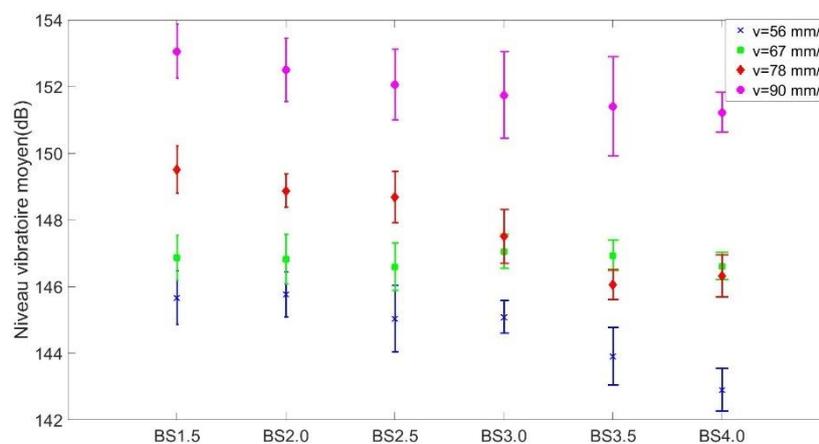


Figure 53 : Effet de la vitesse de rotation sur le niveau vibratoire moyen mesuré pour chaque papier en cellulose

4.7.3. Effet de l'âge et du genre

L'étude de l'effet de l'âge et du genre a été réalisée pour une force normale de 0,3 N et une vitesse de rotation de 56 mm/s.

4.7.3.1. Coefficient de frottement

La Figure 54 présente les coefficients de frottement sous forme de box plot obtenus pour les différents groupes du panel de volontaires, pour le papier en cellulose BS4,0. Les boîtes roses correspondent aux valeurs obtenues pour les groupes féminins et les bleues pour les groupes masculins. Chaque groupe est indiqué par la lettre M (Masculin) ou F (Féminin) suivie de la catégorie d'âge considérée (20 pour les 20-29 ans et ainsi de suite). La médiane des valeurs est indiquée par un trait vert. L'étoile indique une différence significative entre deux groupes de valeurs ($p < 0,05$). On peut d'ores et déjà noter des écart-types parfois importants, notamment pour le groupe de femmes âgées de 40 à 49 ans. Cet écart-type est en partie dû aux caractéristiques individuelles de chaque volontaire.

Nous ne présentons en détail que les résultats obtenus pour le papier en cellulose BS4,0. Cependant, le Tableau 7 récapitule l'ensemble des p-values obtenues par analyses statistiques (ANOVA) pour tous les papiers en cellulose.

De manière globale, on remarque que l'effet du genre est significatif sur le coefficient de frottement mesuré, quelque-soit le papier en cellulose considéré et le groupe d'âges ($p < 0,05$). En effet,

le coefficient de frottement obtenu pour les femmes est systématiquement plus élevé par rapport à ceux obtenus pour les hommes.

La majorité des recherches ayant étudié l'effet du genre sur le coefficient de frottement n'ont rapporté aucune différence significative [161], [187], [190], [196], [208], [209]. Seul Zhu *et al.* ont observé des coefficients de frottement plus élevés chez les femmes [210]. Néanmoins, ils ont expliqué ce résultat en disant que la population étudiée dans leur travail était d'origine chinoise, contrairement aux autres études qui s'intéressent à des populations caucasiennes.

Notre hypothèse pour tenter d'expliquer nos résultats se base sur l'étude des propriétés mécaniques de la peau. Dans le chapitre 3, nous avons montré que la peau des femmes avait un module de Young significativement plus faible que celui des hommes. Ainsi, lorsque le frotteur presse la peau des femmes, la déformation est plus importante. Or, d'après le modèle de frottement « à deux termes » de Bowden et Tabor, la force de frottement peut être définie par la contribution de deux parties indépendantes : la composante interfaciale et celle de déformation [107]. Il est souvent admis que la contribution adhésive est prépondérante, cependant la déformation joue un rôle également du fait des propriétés viscoélastiques de la peau. Comme dans notre étude, il n'y a aucune différence significative en termes d'hydratation cutanée entre les hommes et les femmes, on peut penser que la composante interfaciale n'est pas très différente d'un genre à l'autre. Par contre, si la déformation de la surface de peau des femmes est plus importante alors cela engendre un frottement plus important.

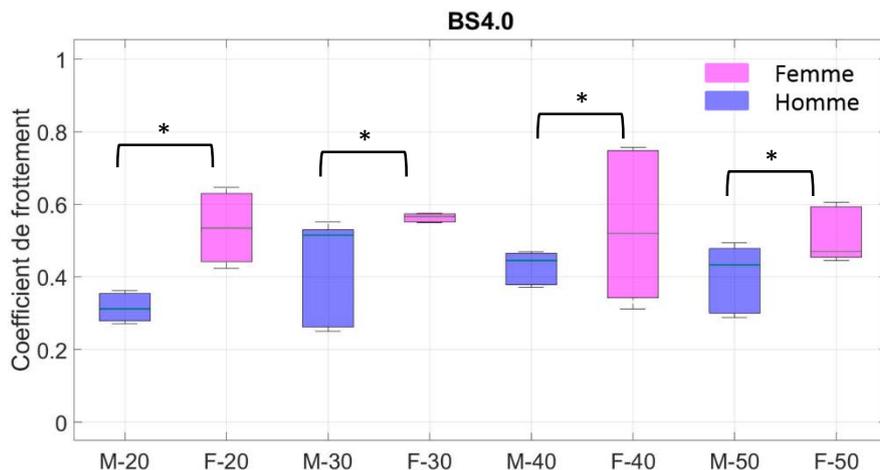


Figure 54 : Effet de l'âge et du genre sur le coefficient de frottement pour la feuille de base BS4,0

En ce qui concerne l'effet du vieillissement sur le coefficient de frottement entre la peau et le papier en cellulose, on remarque globalement deux tendances. Dans un premier temps, on a une légère augmentation du coefficient de frottement en passant du groupe d'âges [20 : 29] ans au groupe d'âges [30 : 39] ans, puis une stabilisation du coefficient de frottement par la suite. En effet, les analyses statistiques ne montrent aucune différence significative ($p > 0,05$) sur le coefficient de frottement à partir de 30 ans, pour les hommes et les femmes.

L'indépendance du coefficient de frottement vis-à-vis du vieillissement de la peau a déjà été observée dans plusieurs études [161], [177], [187], [189], [190], [196], [209]. Ce résultat est assez surprenant dans le sens où l'on pourrait s'attendre à une augmentation du coefficient de frottement avec le vieillissement de la peau qui corrèle avec une diminution de ses propriétés mécaniques (*cf.* chapitre 3). En effet, une diminution du module de Young de la peau devrait entraîner une déformation plus importante de celle-ci lors du frottement et donc une force de frottement plus importante. Cottenden explique que ce phénomène n'est visible que pour des personnes âgées de plus de 70 ans, pour lesquelles la déformation de la peau est très importante [211]. Pour notre étude, le panel a été

recruté parmi les personnes travaillant au sein du laboratoire, il n'a donc pas été possible de trouver des volontaires âgés de plus de 70 ans.

Tableau 7 : Récapitulatif des p-values obtenues pour l'étude de l'effet de l'âge et du genre sur le coefficient de frottement

Papier	Effet de l'âge		Effet du genre			
	Homme	Femme	20-29 ans	30-39 ans	40-49 ans	>50 ans
BS1,5	Global : <0,05	Global : <0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
	M20 exclu : 0,89	F20 exclu : 0,067				
BS2,0	Global : <0,05	Global : <0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
	M20 exclu : 0,35	F20 exclu : 0,074				
BS2,5	Global : <0,05	Global : <0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
	M20 exclu : 0,24	F20 exclu : 0,061				
BS3,0	Global : <0,05	Global : <0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
	M20 exclu : 0,081	F20 exclu : 0,39				
BS3,5	Global : <0,05	Global : <0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
	M20 exclu : 0,71	F20 exclu : 0,058				
BS4,0	Global : <0,05	Global : 0,048	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
	M20 exclu : 0,86					

4.7.3.2. Analyse des différentes contributions du coefficient de frottement peau/papier en fonction du genre et de l'âge

Pour comprendre l'indépendance du coefficient de frottement vis-à-vis du vieillissement de la peau, nous avons évalué la contribution des différents termes dans l'expression du coefficient de frottement de Bowden et Tabor.

Cette analyse nécessite de réaliser des tests de frottement pour différents efforts normaux. De plus, comme nous nous intéressons à l'effet du genre et de l'âge sur la valeur des différents termes de frottement, les tests ont dû être réalisés sur des volontaires de genre et âge différents. Pour limiter le nombre d'essais, nous n'avons testé que deux efforts normaux, $F_z = 0,3 N$ et $F_z = 0,5 N$, sur quatre volontaires : un homme jeune de 25 ans, une femme jeune de 25 ans, un homme âgé de 61 ans et une femme âgée de 58 ans. Ces quatre volontaires ont été choisis pour être représentatifs de l'effet du genre et de l'âge sur les différents termes du coefficient de frottement.

L'analyse est détaillée pour le papier en cellulose BS4,0.

D'après le modèle de Bowden et Tabor, le coefficient de frottement μ est la somme de trois contributions : $\mu = \mu_{adh} + \mu_{cis} + \mu_{def}$. Afin de comparer l'influence de ces trois termes sur la valeur totale du coefficient de frottement, nous avons tracé la variation de l'effort tangentielle en fonction de la valeur de l'effort normal (Figure 55). Dans le cas d'une force normale nulle, la force tangentielle associée est différente de zéro. Cette valeur montre l'existence d'un coefficient de frottement statique non nul impliquant une déformation élastique seuil nécessaire au glissement entre les deux surfaces. Il peut être interprété comme correspondant à la partie adhésive, F_{adh} , de la force de frottement. La pente, $\frac{\Delta F_x}{\Delta F_z}$, correspond, quant à elle, aux contributions de la déformation, μ_{def} , et du cisaillement, μ_{cis} , dans le coefficient de frottement.

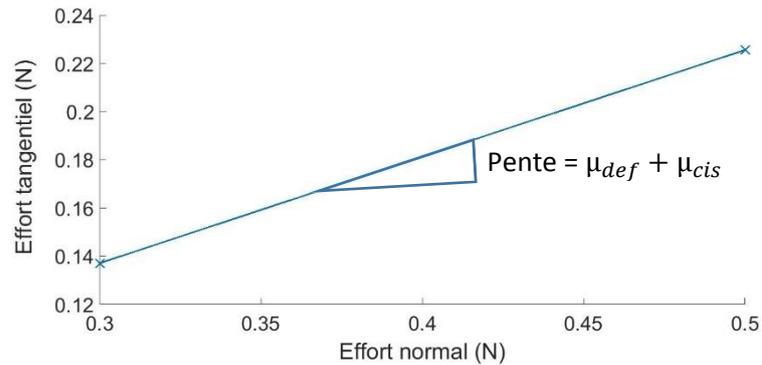


Figure 55 : Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale sur la peau de l'avant-bras d'un sujet féminin de 25 ans

Ensuite, connaissant le coefficient de frottement total, la partie adhésive, le facteur de perte $\tan\delta$ et le module d'élasticité de la peau, il est possible de calculer séparément μ_{def} et μ_{cis} .

μ_{def} est calculé grâce à la relation de Tabor et Greenwood (cf. 4.3.3) :

$$F_{def} = \tan\delta \left(\frac{9}{128R}\right)^{2/3} \left(\frac{1 - \nu^2}{E}\right)^{1/3} F_N^{4/3}$$

L'évaluation du facteur de perte $\tan\delta$ dépend de l'enfoncement (amplitude de déformation) de la peau suite à son indentation. La littérature nous permet d'avoir une correspondance entre valeur de l'enfoncement de la peau et facteur de perte [153]. Or les tests d'indentation sans contact réalisés au chapitre 3 nous permettent de calculer l'enfoncement de la peau suite à un impact d'air de pression imposée. La Figure 56 représente l'enfoncement de la peau pour les quatre sujets choisis. On remarque que l'enfoncement augmente avec l'âge et qu'il est plus élevé pour les femmes par rapport aux hommes de la même tranche d'âge. La correspondance entre enfoncement de la peau et facteur de perte est présentée dans le Tableau 8. Pour le module d'élasticité, on reprend les valeurs obtenues au chapitre 3.

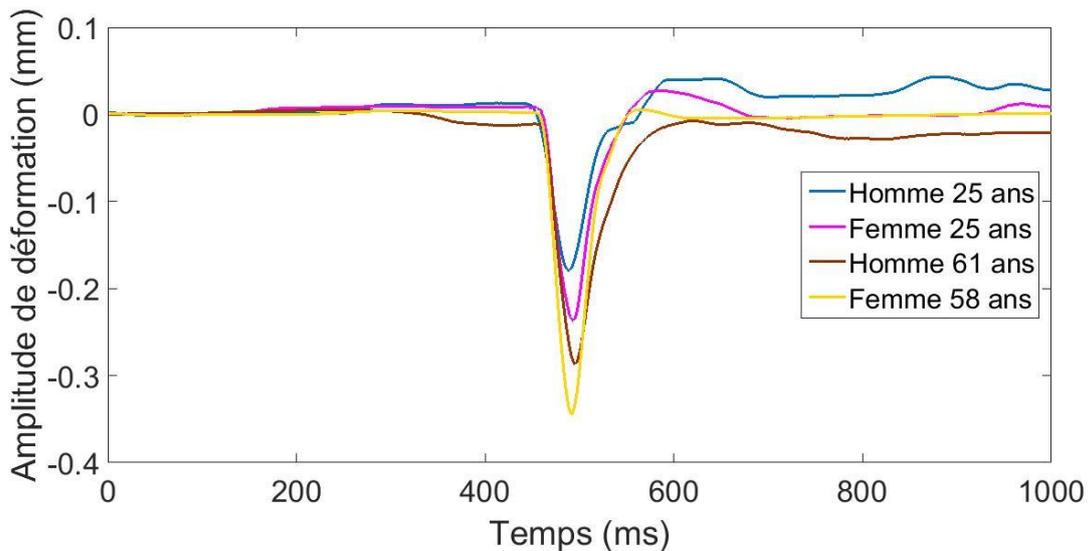


Figure 56 : Enfoncement de la peau suite à un impact d'air de pression imposée : effet de l'âge et du genre

Tableau 8 : Tableau des correspondances entre l'enfoncement de la peau et le facteur de perte estimé

	Enfoncement de la peau (μm)	Facteur de perte estimé
Homme 25 ans	177	0.013
Femme 25 ans	236	0.019
Homme 61 ans	289	0.024
Femme 58 ans	350	0.032

Après avoir estimé μ_{def} , et connaissant la valeur totale du coefficient μ et sa partie adhésive, on en déduit la valeur du coefficient dû au cisaillement μ_{cis} . L'ensemble des valeurs obtenues pour les différents termes du coefficient de frottement sont indiquées dans le Tableau 9.

La partie adhésive issue du calcul du coefficient de frottement est faible devant la partie liée à la déformation et au cisaillement. C'est le terme dû au cisaillement interfacial qui contribue le plus au coefficient de frottement total. Néanmoins, on remarque que la partie du coefficient de frottement due à la déformation de la peau est plus importante chez les sujets âgés. On observe un facteur 2,4 entre le sujet masculin jeune et le sujet masculin âgé et un facteur 2,5 entre les sujets féminins. Au contraire, la partie due au cisaillement interfacial et à l'adhésion est plus élevée chez les sujets jeunes.

L'augmentation, avec le vieillissement, de la partie du coefficient de frottement due à la déformation de la peau peut s'expliquer par la diminution de l'élasticité de la peau. D'autre part, la partie due à l'adhésion de la peau est fonction de l'aire de contact entre la surface cutanée et le frotteur. Or, le vieillissement de la peau s'accompagne d'une augmentation de la rugosité de la peau [196]. Cette augmentation de rugosité diminue l'aire de contact et donc la partie adhésive du coefficient de frottement.

L'indépendance du coefficient de frottement peau/papier vis-à-vis du vieillissement cutané, peut en partie s'expliquer par la différence de contribution de l'adhésion et de la déformation en fonction de l'âge. En effet, il semble que la partie due à la déformation de la peau, μ_{def} , joue également un rôle important pour les personnes plus âgées.

Tableau 9 : Effet de l'âge et du genre sur les valeurs des différents termes du coefficient de frottement

	μ_{adh}	μ_{def}	μ_{cis}
Homme 25 ans	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,44
Femme 25 ans	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	0,43
Homme 61 ans	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,41
Femme 58 ans	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	0,39

4.7.3.3. Niveau vibratoire moyen

La Figure 57 présente l'effet de l'âge et du genre sur les niveaux vibratoires obtenus pour le papier en cellulose BS4,0.

Nous ne présentons que les résultats obtenus pour le papier en cellulose BS4,0. Néanmoins, les tendances observées sont les mêmes pour tous les autres papiers en cellulose, seules les valeurs de niveaux vibratoires changent d'un papier à l'autre.

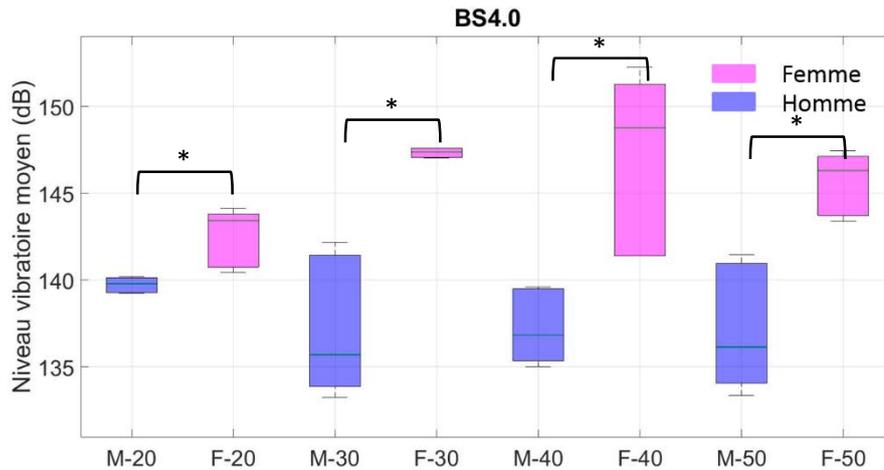


Figure 57 : Effet de l'âge et du genre sur le niveau vibratoire moyen pour la feuille de base BS4,0

Comme observé précédemment pour les valeurs de coefficients de frottement, on remarque que l'effet du genre est significatif sur les niveaux vibratoires moyens mesurés, quelque-soit la classe d'âges et le papier en cellulose considérés (ANOVA : $p < 0,05$). De plus, on remarque que l'écart entre femmes et hommes s'accroît après 30 ans. Djaghoul *et al.* ont étudié le frottement de trois textiles contre la peau de l'avant-bras des sujets et ont mesuré les vibrations induites à 35 mm de la source de sollicitation [212]. Ils ont obtenu des résultats similaires sur un panel de 60 volontaires hommes et femmes, âgés de 25 à 70 ans. La différence homme/femme est essentiellement expliquée par la différence en termes de propriétés mécaniques de la peau.

Concernant l'effet de l'âge, on observe une tendance différente pour les hommes et les femmes. En effet, pour les hommes, le niveau vibratoire moyen a tendance à être assez constant au cours du processus de vieillissement (pas de différence significative : $p > 0,05$). Au contraire, le niveau vibratoire moyen obtenu pour les groupes de femmes augmente significativement en fonction de l'âge ($p < 0,05$). Encore une fois, on remarque que les valeurs obtenues pour les femmes entre 40 et 49 ans sont très étendues.

Peu d'études se sont intéressées à l'étude des vibrations induites par le frottement de la peau par un textile et à l'effet du vieillissement. Dans une première étude, Zahouani *et al.* se sont intéressés à l'effet du vieillissement de la peau sur ses propriétés tribologiques [213]. Pour cela, ils ont utilisé un système de frottement linéaire couplé à une mesure acoustique des vibrations durant le frottement. Ils ont montré que la mesure de ces vibrations donnait une information essentielle sur la dissipation d'énergie de frottement. Leur étude a porté sur un panel de 46 femmes âgées de 18 à 70 ans. Leurs résultats montrent une augmentation significative du niveau vibratoire en fonction de l'âge. En effet, ils observent une différence de 2,5 dB entre le groupe le plus jeune et le plus âgé. Cette augmentation de niveau vibratoire indique une augmentation de l'énergie dissipée durant le frottement, qui corrèle avec une diminution de l'élasticité de la peau.

Dans une autre étude, Zahouani *et al.* ont confirmé que le niveau acoustique augmentait sous l'effet du vieillissement chronologique [105]. Ils ont comparé cette fois, les résultats obtenus sur 15 enfants et 15 femmes adultes caucasiennes et ont montré qu'il y avait une augmentation de 2 dB du niveau acoustique moyen.

Nos résultats sont en accord avec ceux de la littérature concernant les femmes. Malheureusement, aucune étude ne s'est intéressée au cas des hommes.

4.7.4. Effet de la qualité tactile des papiers en cellulose

Nous étudions maintenant l'effet du papier en cellulose sur le coefficient de frottement et le niveau vibratoire moyen obtenu. Nous ne présentons que les graphiques correspondant au groupe de femmes âgées entre 20 et 29 ans. Les tendances sont similaires pour les autres groupes de volontaires.

4.7.4.1. Coefficient de frottement

La Figure 58 présente les valeurs de coefficients de frottement obtenus pour les différents papiers en cellulose pour le groupe de femmes âgées de 20 à 29 ans. Les coefficients de frottement mesurés correspondent aux coefficients de frottement classiquement trouvés pour une interaction textiles non-tissés et peau humaine [211].

On remarque que le papier a un effet significatif sur le coefficient de frottement mesuré. Les papiers en cellulose qui engendrent un frottement moins élevé sont les BS1,5 – BS3,5 et BS4,0. Les BS1,5 et BS4,0 correspondent aux papiers en cellulose dont les coefficients de frottement obtenus avec le doigt artificiel étaient les moins élevés, c'est-à-dire dont la pilosité est la moins importante (cf. chapitre 2). Au contraire, les papiers ayant une pilosité importante (BS2,5 et BS3,0) ont un coefficient de frottement avec la peau plus élevé. Par contre, la BS2,0 considérée comme un papier lisse présente le coefficient de frottement contre la peau le plus élevé.

De précédentes études ont démontré que la pilosité des textiles était à l'origine d'un frottement plus élevé [198]. Cependant, Cottenden a nuancé ce propos en montrant que la pilosité du textile était un paramètre important dans le frottement mais que les propriétés de la peau (hydratation, âge, genre..) étaient également essentielles [211].

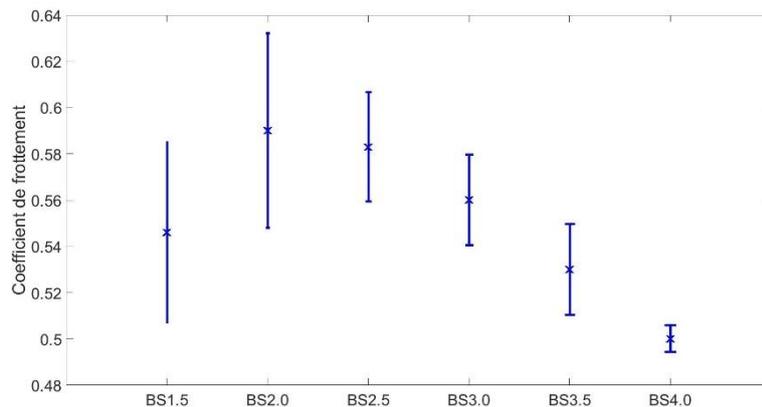


Figure 58 : Coefficients de frottement obtenus pour les différents papiers en cellulose pour le groupe de femmes entre 20 et 29 ans

4.7.4.2. Niveau vibratoire moyen

La Figure 59 présente les valeurs de niveaux vibratoires moyens obtenus pour les différents papiers en cellulose pour le groupe de femmes âgées de 20 à 29 ans.

On remarque que le niveau vibratoire moyen permet une bonne discrimination des papiers en fonction de leur douceur perçue (cf. chapitre 2). En effet, plus le papier est perçu doux, plus le niveau vibratoire moyen diminue. La BS1,5 qui est considérée comme le papier en cellulose le moins doux, a un niveau vibratoire moyen d'environ 145,5 dB comparé à la BS4,0 (papier le plus doux), dont le niveau vibratoire moyen est de 143 dB, soit un écart de 2,5 dB.

Le classement des papiers en cellulose en fonction de leurs niveaux vibratoires moyens est identique à celui obtenu avec le doigt artificiel.

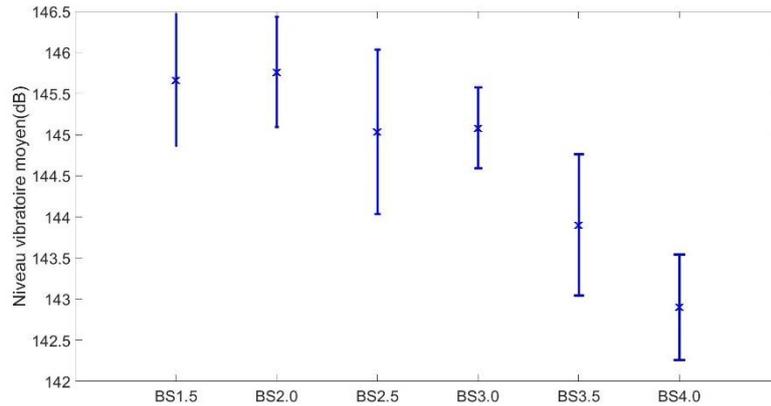


Figure 59 : Niveaux vibratoires moyens obtenus pour les différents papiers en cellulose pour le groupe de femmes entre 20 et 29 ans

4.8. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'étudier les propriétés tribologiques de l'interaction peau/papier en cellulose en fonction de l'âge et du genre du volontaire et du type de papier en cellulose. Les travaux de recherche dans ce domaine ont montré que ces propriétés dépendaient d'un ensemble de paramètres caractéristiques de la peau, du matériau en contact mais également de l'environnement dans lequel était réalisée la mesure. Il a donc été nécessaire de fixer certains paramètres pour se concentrer sur les effets que l'on souhaitait étudier. Les mesures ont donc été réalisées dans un environnement contrôlé en humidité et température. Nous avons également veillé à ce que les volontaires aient une peau normalement hydratée car l'hydratation influence beaucoup le comportement tribologique du tissu cutané.

Pour réaliser les mesures, un tribomètre rotatif couplé à une mesure de vibrations de la peau a été développé. Son originalité vient du fait qu'il permet d'avoir une mesure du coefficient de frottement à l'interface peau/papier et d'obtenir en même temps une information sur les vibrations induites lors du frottement.

La majorité des études précédentes se sont cantonnées à des panels très restreints en nombre. Pour tenir compte de la diversité des peaux et évaluer l'effet de l'âge et du genre sur les paramètres mesurés, nous avons recruté un panel de 59 volontaires, hommes et femmes, âgé de 20 à 62 ans.

Les résultats ont montré que la vitesse de rotation du frotteur et la force normale appliquée sur la peau avait, globalement, un effet sur les paramètres mesurés. Nous avons donc choisi de fixer la force normale à 0,3 N et la vitesse de rotation à 56 mm/s pour l'étude suivante concernant l'irritation cutanée.

Ensuite, nous avons mis en évidence un effet de genre sur le coefficient de frottement et le niveau vibratoire moyen. Nous avons attribué cet effet aux différences de propriétés mécaniques de la peau mises en évidence dans le chapitre 3.

Par contre, étonnamment, aucun effet dû au vieillissement n'a été observé malgré la diminution de l'élasticité de la peau observée avec l'avancée en âge. On a vu que le frottement possédait une composante adhésive, une composante due au cisaillement interfacial et une composante de déformation. Globalement, on a vu que le coefficient de frottement était principalement dû au cisaillement interfacial. Néanmoins, les propriétés mécaniques de la peau diminuant avec l'âge, la composante de déformation est plus importante pour les sujets âgés. Au contraire, l'adhésion est plus importante chez les sujets jeunes [214]. En effet, la peau jeune étant plus lisse (moins de plis cutanés), l'aire de contact réelle entre la surface de la peau et le frotteur est plus importante, d'où une adhésion plus élevée. C'est ce qui pourrait expliquer le fait que le coefficient de frottement ne soit pas différent en fonction de l'âge des sujets.

Enfin, nous avons montré des différences significatives du coefficient de frottement et du niveau vibratoire moyen en fonction du papier en cellulose. Il est donc fort probable que ces différences se traduisent par un inconfort et une irritation cutanée plus ou moins marquées après un frottement répété sur la peau. Cette étude fait l'objet du prochain chapitre. Pour finir, nous avons remarqué que les valeurs de coefficients de frottement et de niveaux vibratoires moyens étaient corrélées aux paramètres physiques mesurés avec le doigt artificiel.

Chapitre 5

Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété de papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

Sommaire

5.1. Introduction et objectifs.....	92
5.2. Etude de l'irritation cutanée induite par le frottement répété de papiers en cellulose sur la peau : frottement à sec	92
5.2.1. Protocole expérimental	92
5.2.1.1. Frottement répété des papiers en cellulose : paramètres d'essai.....	92
5.2.1.2. Méthodes d'évaluation de l'irritation cutanée	93
5.2.1.3. Etapes du protocole expérimental	95
5.2.2. Résultats et Discussion	96
5.2.3. Conclusion	99
5.3. Etude l'irritation cutanée induite par le frottement répété de papiers en cellulose sur la peau : frottement en conditions humides	100
5.3.1. Protocole expérimental	100
5.3.1.1. Frottement répété des papiers en cellulose : paramètres d'essai.....	100
5.3.1.2. Méthodes d'évaluation de l'irritation cutanée	100
5.3.1.3. Etapes du protocole expérimental	100
5.3.2. Résultats et Discussions	102
5.3.2.1. Taux d'hydratation de la peau	102
5.3.2.2. Coefficients de frottement	103
5.3.2.3. Evolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau suite au frottement répété en conditions humides.....	105
5.3.3. Conclusion	107
5.4. Conclusion sur le chapitre	107
Annexes.....	112

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

5.1. Introduction et objectifs

Le frottement répété de la peau contre les textiles de manière générale, et en particulier les papiers en cellulose peut être source d'irritation cutanée. Cette irritation peut être causée par la présence de produits chimiques irritants ou allergisants sur les papiers (lotion sur les mouchoirs en papiers ou lingettes, parfum sur le mandrin des papiers toilette, produits chimiques incorporés lors du processus de fabrication des papiers et textiles...), ou alors par les caractéristiques tribologiques du contact papier/surface cutanée.

De nombreuses études se sont intéressées à l'endommagement de la peau induit par le frottement de textiles lors de la pratique sportive. Cependant, les papiers en cellulose ont suscité moins d'intérêt. Récemment, la société Kimberly-Clark a développé un test *in vitro* de prédiction de l'endommagement de la peau suite à un frottement répété de papiers toilette [215]. Leur protocole de frottement sur peau artificielle (substrat mimant parfaitement les propriétés de surface de la peau humaine en termes de topographie, pH, tension de surface) permet de reproduire les effets du frottement répété des papiers sur peau *in vivo*. Cependant, l'utilisation d'une peau artificielle ne reflète pas toute la diversité des peaux humaines, il paraît donc nécessaire de mener une étude *in vivo* sur un panel de volontaires.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'évaluation de l'irritation cutanée et à l'endommagement du *stratum corneum* induits par le frottement répété de papiers en cellulose. Le comportement tribologique de l'interface peau/papier en cellulose et ses effets sur l'irritation seront étudiés :

- dans une première partie, dans le cas d'un frottement sec.
- dans une seconde partie, dans le cas d'un frottement « humide », grâce à l'ajout de différentes solutions à l'interface peau/papier

La seconde partie constitue une première étape vers un frottement répété de papiers en cellulose contre la peau, se rapprochant des conditions réelles d'usage. Les résultats présentés ne peuvent, à ce stade, être généralisés en raison du faible nombre d'essais.

Les mesures ont été réalisées sur le même panel de volontaires pour assurer une continuité avec les autres études.

L'objectif sera de déterminer si la qualité tactile des papiers en cellulose (douceur et pilosité) a un effet sur le degré d'irritation cutanée.

5.2. Etude de l'irritation cutanée induite par le frottement répété de papiers en cellulose sur la peau : frottement à sec

5.2.1. Protocole expérimental

5.2.1.1. Frottement répété des papiers en cellulose : paramètres d'essai

Le frottement répété des papiers en cellulose contre la peau a été réalisé avec le tribomètre rotatif présenté dans le chapitre 4.

La force normale a été fixée à 0,3 N et la vitesse à 56 mm/s. La durée du frottement pour un papier en cellulose a été choisie à 5 minutes de manière à observer des signes de réactions cutanées. Lors du test *in vivo*, le sujet est susceptible de bouger et donc la force normale appliquée de varier. Le test de frottement de 5 minutes a donc été réalisé en 5 fois (5 tests de 1 minute chacun). Après chaque test de 1 minute, on change le papier en cellulose et on contrôle la force normale appliquée.

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

5.2.1.2. Méthodes d'évaluation de l'irritation cutanée

L'évaluation de l'irritation de la peau a été réalisée avec les techniques biophysiques et le dispositif d'indentation sans contact présentés dans le chapitre 3.

Taux d'hydratation de la peau

Le taux d'hydratation de la peau a été mesuré avec le cornéomètre CM 825 de la société Courage + Khazaka electronic GmbH (Figure 60). Le principe du dispositif est basé sur la mesure du changement de la constante diélectrique de la peau en fonction de son hydratation. Nous réalisons 3 mesures consécutives et la valeur conservée est la moyenne des trois.

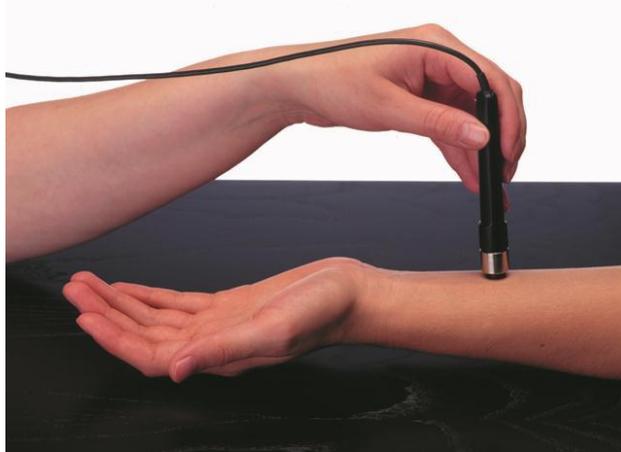


Figure 60 : Dispositif de mesure du taux d'hydratation de la peau : le Cornéomètre CM 825

Perte Insensible en eau

Pour les mesures de perte insensible en eau, nous avons utilisé le *Tewamètre TM300*[®] de la société Courage + Khazaka electronic GmbH (Figure 61). Il s'agit d'un appareil utilisant le principe de la chambre ouverte (sonde de mesure ouverte à l'air ambiant). La perte insensible en eau est exprimée en g/h/m². Pour chaque test, la sonde de mesure est posée sur la surface de la peau pendant 30 secondes. Une valeur est prise toutes les secondes. La valeur finale correspond à la moyenne de toutes les valeurs mesurées pendant les 30 secondes. Dans le cas où l'écart-type est supérieur à 0,2, la mesure est recommencée.



Figure 61 : Dispositif de mesure de la perte insensible en eau : le Tewamètre TM300

Flux sanguin

La mesure du flux sanguin est obtenue avec le moniteur laser doppler *PeriFlux 5000 LDPM* de la société Perimed (Figure 62). La sonde est directement fixée sur la peau avec un adhésif spécifique à

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

la mesure. Une mesure dure 1 minute et la fréquence d'échantillonnage est réglée à 128 Hz (fréquence d'échantillonnage la plus élevée qui soit accessible avec l'appareil). La valeur finale du flux sanguin correspond à la moyenne sur toutes les valeurs.

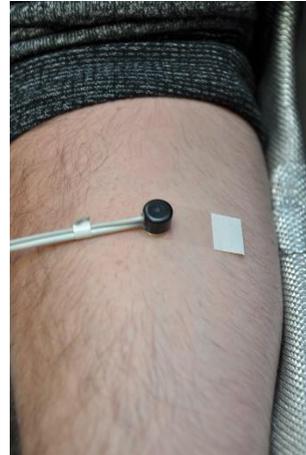


Figure 62 : A gauche, le moniteur laser doppler et à droite, la sonde de mesure fixée sur la peau

Rougeur de la peau

La rougeur de la peau est évaluée avec le chromamètre Minolta CR-300 de la société Konica Minolta Sensing (Figure 63). Il permet de mesurer instantanément la couleur de la peau dans le référentiel $L^*a^*b^*$ de la Commission Internationale de l'Eclairage (cf. Chapitre 3). Pour chaque mesure, nous ne conservons que la valeur a^* qui correspond à la mesure de la rougeur. Cette valeur correspond à la moyenne effectuée sur 3 mesures consécutives.



Figure 63 : Chromamètre Minolta CR-300

Propriétés mécaniques

L'évaluation des propriétés mécaniques de la peau a été réalisée avec le dispositif d'indentation sans contact présenté dans le chapitre 3. A chaque fois, nous avons effectué 3 mesures. La valeur du module de Young retenue correspond à la moyenne des trois essais.

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

5.2.1.3. Etapes du protocole expérimental

Zones de mesures

Les papiers en cellulose ont été testés deux par deux, chacun sur une zone de peau différente. Le positionnement des zones est présenté sur la Figure 64. Le choix de la zone en fonction du papier en cellulose testé est fait de manière aléatoire et est différent pour chaque volontaire.

Une zone de contrôle a également été définie sur le bras gauche. Dans cette zone, aucun test de frottement n'est réalisé mais les paramètres biophysiques sont mesurés pour s'assurer qu'ils n'ont pas subi de grosses variations dues à l'environnement extérieur ou à l'état d'émotion du volontaire par exemple.

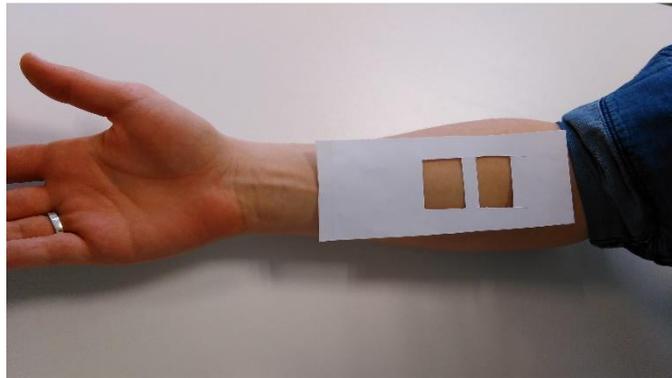


Figure 64 : Positionnement des zones de test sur l'avant-bras droit du volontaire

Installation du volontaire

Tout d'abord, nous avons demandé au volontaire de ne pas utiliser de crème sur la zone de mesure 24h avant le test. Dans le cas de présence de poils dans la zone de peau étudiée, ces derniers ont été rasés 24h avant le test.

Avant chaque série de mesures, le volontaire a respecté une période d'acclimatation de dix minutes minimum dans la salle de mesures, dont la température et l'humidité ont été fixées respectivement à $23\pm 2^\circ\text{C}$ et $55\pm 5\%$.

Pour éviter au maximum les mouvements du sujet au cours de l'essai, le volontaire est installé dans un fauteuil et son bras est maintenu par un dispositif de « repose-bras ».

Mesure des paramètres biophysiques et mécanique de la peau « saine »

Avant le test de frottement d'un papier en cellulose sur la zone de peau considérée, nous avons mesuré les paramètres suivants :

- Perte Insensible en Eau : 30 secondes de mesure
- Rougeur de la peau, valeur a^* : 3 mesures
- Flux sanguin : 1 minute de mesure
- Vitesse de propagation : 3 mesures

Test de frottement

Le test de frottement a été réalisé en 5 étapes d'une durée de 1 minute chacune. La durée totale du frottement était donc de 5 minutes. Entre chaque étape, nous avons changé le papier en cellulose et contrôlé la force normale exercée sur la peau. Durant le changement de papier, le volontaire n'a pas bougé.

Mesure des paramètres biophysiques et mécanique de la peau après frottement répété

5 minutes après le test de frottement du papier en cellulose sur la zone de peau considérée, nous avons mesuré de nouveau les paramètres suivants :

- Perte Insensible en Eau : 30 secondes de mesure
- Rougeur de la peau, valeur a* : 3 mesures
- Flux sanguin : 1 minute de mesure
- Vitesse de propagation : 3 mesures

Zone de contrôle

Pour vérifier que les mesures biophysiques (Perte Insensible en Eau, hydratation, rougeur, flux sanguin et propriété mécanique) ne sont pas influencées par des paramètres autres que l'irritation engendrée par le frottement répété, un contrôle est nécessaire. Pour cela, nous mesurons les paramètres biophysiques de la zone de peau servant de contrôle, en même temps que les zones de peau soumises au frottement répété.

5.2.2. Résultats et Discussion

Pour évaluer l'effet des différents papiers en cellulose sur l'irritation engendrée sur la peau, nous avons calculé le taux de variation de chaque paramètre étudié. Ce taux de variation τ est défini tel que :

$$\tau = \frac{Valeur_{peau\ saine} - Valeur_{après\ frottement\ répété}}{Valeur_{peau\ saine}} \times 100$$

L'ensemble des résultats en fonction du sexe, de l'âge et des papiers en cellulose sont présentés sous forme de tableaux en annexe. Le Tableau 10 présente les p-values obtenues avec les analyses statistiques visant à étudier l'effet potentiel de l'âge et du genre sur l'évolution des valeurs biophysiques et mécanique suite à l'irritation par frottement répété. Les p-values inférieures à 0,05 sont indiquées en gras. Elles traduisent un effet significatif de l'âge ou du genre sur l'évolution de la variable mesurée.

5.2.2.1. Effet de l'âge et du genre

A l'exception de trois valeurs, on remarque que l'ensemble des p-values sont supérieures au seuil de 0,05. Cela traduit le fait que l'âge et le genre du volontaire n'ont pas d'effet significatif sur l'évolution des variables biophysiques et mécanique suite au frottement répété de papiers en cellulose. L'irritation cutanée engendrée par le frottement répété de papier en cellulose sur la peau ne semble donc pas être liée à l'âge et au genre du sujet, en tout cas en ce qui concerne notre panel d'étude.

On note néanmoins des p-values inférieures au seuil 0,05 dans trois cas qui concernent tous l'évolution de la rougeur de la peau après frottement. D'un côté, la rougeur de la peau peut être influencée par l'émotion du volontaire au moment de la mesure. D'un autre côté, le papier en cellulose n'étant pas homogène, il est possible que certains échantillons provenant du même papier soient un peu différent en termes de confort, de qualité tactile. Ceci pourrait être à l'origine des différences observées. Néanmoins, comme elles ne concernent qu'une infime partie des p-values calculées, on peut raisonnablement penser que ni l'âge ni le genre n'ont un effet significatif sur le taux de variation des variables biophysiques et mécanique.

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

Peu d'études ont investigué l'effet de l'âge ou du genre sur l'irritation de la peau. Singh *et al.* [216] ont étudié l'effet d'une iontophorèse saline (utilisation d'un faible courant électrique pour faire passer une solution saline à travers la peau) sur l'intégrité de la fonction barrière de la peau. Dans leur étude, ils ont pris en compte l'ethnie et le genre du volontaire. Ils ont montré que le genre n'avait aucune influence sur l'intégrité de la fonction barrière contrairement à l'ethnie.

Il est essentiel de noter que nos résultats s'appliquent à notre panel de volontaires. Dans notre étude, les volontaires sont tous des personnes travaillant au laboratoire et non rémunérées. L'étude n'intègre donc ni enfant ni personne vraiment âgée (plus de 70 ans). Ce panel restreint peut représenter un biais pour l'étude en fonction du vieillissement. De plus, les tests ne peuvent pas excéder 45 min – 1 heure pour le confort des volontaires.

Dans le chapitre 4, nous avons montré que le coefficient de frottement était indépendant de l'âge du volontaire (dans le cadre de notre panel), malgré les modifications physiologiques et mécaniques de la peau avec le vieillissement. Ce résultat explique en partie l'absence de différence en termes d'irritation cutanée suite au frottement répété. De plus, les mesures *in vivo* impliquent certaines contraintes temporelles. Un test de frottement sur plusieurs jours aurait, peut-être, pu mettre en évidence une différence entre des peaux jeunes et des peaux plus âgées.

Tableau 10 : Tableau des analyses statistiques (*p*-value) pour l'étude de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : effet de l'âge et du genre. Les valeurs en gras désignent les *p*-valeurs inférieures à 0,05.

Papiers	Variables	Effet âge		Effet genre			
		Homme	Femme	20-29 ans	30-39 ans	40-49 ans	>50 ans
BS1,5	Module	0,823	0,813	0,759	0,403	0,297	0,351
	Flux sanguin	0,809	0,773	0,541	0,379	0,627	0,782
	Rougeur	0,049 *	0,448	0,944	0,515	0,053	0,031 *
	PIE	0,430	0,610	0,455	0,271	0,819	0,599
BS2,0	Module	0,952	0,839	0,535	0,413	0,772	0,451
	Flux sanguin	0,507	0,827	0,595	0,320	0,611	0,822
	Rougeur	0,208	0,715	0,431	0,508	0,044 *	0,076
	PIE	0,273	0,425	0,903	0,242	0,751	0,827
BS2,5	Module	0,830	0,759	0,288	0,917	0,824	0,911
	Flux sanguin	0,851	0,858	0,577	0,626	0,784	0,883
	Rougeur	0,092	0,570	0,668	0,534	0,530	0,920
	PIE	0,503	0,596	0,193	0,178	0,347	0,654
BS3,0	Module	0,983	0,975	0,930	0,804	0,946	0,866
	Flux sanguin	0,828	0,519	0,993	0,133	0,767	0,448
	Rougeur	0,685	0,928	0,351	0,589	0,514	0,879
	PIE	0,454	0,688	0,892	0,246	0,649	0,889
BS3,5	Module	0,966	0,864	0,883	0,516	0,876	0,842
	Flux sanguin	0,715	0,381	0,944	0,350	0,368	0,773
	Rougeur	0,586	0,749	0,988	0,334	0,857	0,518
	PIE	0,871	0,623	0,241	0,687	0,378	0,239
BS4,0	Module	0,796	0,988	0,626	0,971	0,976	0,896
	Flux sanguin	0,698	0,753	0,746	0,218	0,810	0,440
	Rougeur	0,867	0,759	0,461	0,531	0,637	0,779
	PIE	0,946	0,878	0,478	0,623	0,461	0,650

5.2.2.1. Effet du papier en cellulose

Au vu des résultats (indépendance de l'évolution des variables biophysiques et mécanique vis-à-vis de l'âge et du genre) et pour plus de clarté, nous nous intéressons au groupe de femmes jeunes âgées de 20 à 29 ans.

La Figure 65 présente les taux de variation des paramètres biophysiques et mécanique de la peau des femmes âgées de 20 à 29 ans, après un frottement répété des papiers en cellulose. Pour

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

chaque paramètre, on a le taux de variation moyen associé à son écart-type, obtenu pour chaque papier en cellulose.

Concernant la zone de contrôle (sans frottement), les résultats montrent que les valeurs ne sont pas significativement différentes entre le début et la fin du protocole de mesures ($p \gg 0,05$).

De manière globale, on observe que le frottement répété de tous les papiers en cellulose est à l'origine d'une évolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau. En effet, on note les évolutions suivantes :

- Diminution de la valeur du module de Young après frottement répété,
- Augmentation du flux sanguin, de la rougeur de la peau et de la perte insensible en eau.

Ces observations témoignent de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose (cf. 3.2.2).

De plus, le taux de variation des paramètres biophysiques et mécanique de la peau dépend du papier en cellulose considéré. En effet, une ANOVA nous permet de dire que la nature du papier en cellulose frotté contre la peau du volontaire a un effet significatif ($p < 0,05$) sur l'ensemble des évolutions des paramètres et donc sur le degré d'irritation cutanée engendrée.

On remarque que plus le papier en cellulose est doux (niveau acoustique moyen faible), moins le module de Young diminue. La peau subit donc moins d'endommagement avec un papier en cellulose doux. Une régression linéaire simple nous a permis de confirmer que le taux de variation du module de Young était significativement corrélé à la valeur des niveaux acoustiques moyens (cf. chapitre 4) des papiers frottés contre la peau, avec un coefficient de corrélation de $-0,91$ ($p = 0,011$). On obtient un coefficient de corrélation de $-0,64$ ($p < 0,05$) entre le taux de variation du module de Young et le coefficient de frottement des papiers contre la peau. Ainsi, même si la douceur du papier semble être le paramètre influant le plus sur le module de Young, il semble que sa pilosité ait un rôle important.

Les résultats concernant le flux sanguin montrent également une grande différence entre les différents papiers en cellulose. En effet, le papier le moins doux induit une réaction presque deux fois plus importante que le papier le plus doux. Encore une fois, la douceur du papier en cellulose est grandement responsable du degré d'augmentation du flux sanguin après frottement répété. On obtient d'ailleurs un coefficient de corrélation de $0,77$ ($p < 0,05$) entre le taux de variation du flux sanguin pour les différents papiers en cellulose et leurs niveaux acoustiques moyens. L'analyse de la corrélation entre les coefficients de frottement et le taux de variation du flux sanguin donne un coefficient égal à $0,47$ ($p = 0,35 > 0,05$). La douceur du papier en cellulose joue un rôle clé dans l'augmentation du flux sanguin suite au frottement répété avec ce papier.

Si l'on s'intéresse à la rougeur de la peau, on remarque que le frottement répété de papiers en cellulose engendre une augmentation de sa composante érythémateuse plus ou moins importante. En effet, pour les papiers en cellulose BS3,5 et BS4,0, le taux de variation est inférieur à 10% alors qu'il atteint 25% pour la BS1,5. Au vu des écart-types assez importants, la mesure de la rougeur ne semble pas être la méthode la plus discriminante vis-à-vis de l'irritation cutanée. En effet, on ne note aucune différence significative pour les trois papiers BS2,0 BS2,5 et BS3,0. Néanmoins, ces mesures témoignent encore une fois de l'effet de la douceur des papiers en cellulose sur l'endommagement de la peau après frottement. On trouve, en effet, un coefficient de corrélation de $0,81$ ($p < 0,05$) entre le taux de variation de a^* pour les différents papiers et leurs niveaux acoustiques moyens mesurés au chapitre 4. Pour les coefficients de frottement, le coefficient de corrélation est de $0,49$ ($p = 0,31$).

Enfin, l'augmentation de la perte insensible en eau montre des disparités en fonction des papiers en cellulose. On note également des écart-types plutôt importants, surtout pour la BS4,0. Outre les caractéristiques intrinsèques de chaque sujet, on peut expliquer les écart-types par le fait

que la prise en main de la sonde Tewamètre peut être à l'origine d'une augmentation de sa température. L'analyse statistique donne un coefficient de corrélation de 0,56 ($p=0,36$) entre le taux de variation de la perte insensible en eau et les niveaux acoustiques moyens des papiers et de 0,40 ($p=0,69$) avec les coefficients de frottement.

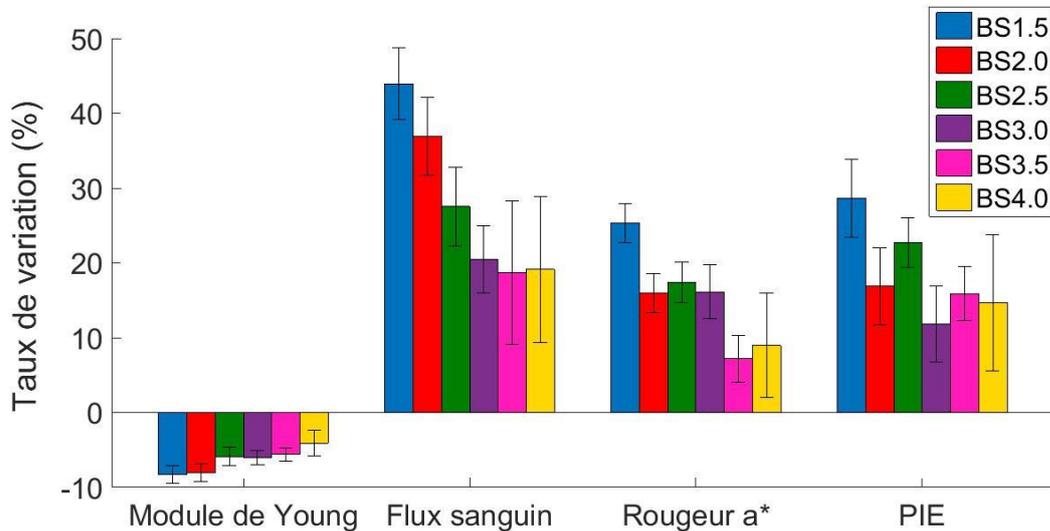


Figure 65 : Taux de variation des paramètres biophysiques et mécanique de la peau des femmes âgées entre 20 et 29 ans, après un test de frottement répété avec les différents papiers en cellulose, du moins doux au plus doux

5.2.3. Conclusion

Nous avons montré que les réactions cutanées engendrées par le frottement répété de papiers en cellulose sur la peau de l'avant-bras étaient relativement indépendantes du genre et de l'âge du volontaire (dans notre gamme d'âges limitée par le choix du panel).

De manière globale, nous avons montré que le frottement répété des papiers en cellulose induisait une diminution du module de Young de la peau et une augmentation du flux sanguin, de la rougeur de la peau et de la perte insensible en eau.

La diminution du module de Young de la peau peut être expliquée par le fait qu'en frottant le papier sur la surface cutanée, on enlève des couches de cornéocytes. Le *stratum corneum* voit alors son épaisseur diminuer. Le module de Young de la peau diminue alors à son tour. Néanmoins, une partie de la diminution du module de Young peut également être due à un changement des propriétés physico-chimiques de la surface cutanée, notamment de la quantité d'eau à la surface. En effet, une augmentation de la quantité d'eau à la surface peut entraîner un ramollissement de la surface de la peau et donc une diminution de sa rigidité.

La diminution des couches de cornéocytes est liée à une altération de la fonction barrière de la peau et donc à son irritation visible au travers de l'augmentation du flux sanguin, de la rougeur et de la perte insensible en eau.

Le frottement de tous les papiers en cellulose induit une réaction de la peau, mais cette dernière est différente en fonction de la nature du papier. En effet, nous avons montré que la douceur du papier influait beaucoup sur l'irritation provoquée, de même que sa pilosité dans une moindre mesure. De manière globale, plus un papier est doux moins il sera irritant et source d'inconfort pour le consommateur. De plus, il semble que la pilosité joue aussi sur l'inconfort. En effet, plus un papier est « pileux », plus il peut potentiellement être source d'inconfort et altérer le *stratum corneum*. En effet, plus le papier est fibreux (pileux), plus ses fibres peuvent adhérer à la peau et arracher des cornéocytes. Pour vérifier cette hypothèse, il faudrait étudier l'effet de deux papiers de douceurs identiques mais l'un lisse et l'autre fibreux.

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

Cette étude de frottement « à sec » nous a permis de mettre en évidence l'importance de la douceur et de la pilosité des papiers en cellulose sur l'irritation engendrée pour la peau. Pour les industriels fabriquant du papier en cellulose, c'est une information essentielle car ils peuvent s'appuyer sur les mesures réalisées au doigt artificiel (niveau vibratoire et coefficient de frottement) pour prédire le confort à l'usage des papiers. Ainsi, ils peuvent réaliser une pré-sélection des papiers en cellulose respectant leurs exigences pour ensuite en avoir moins à tester sur des panels *in vivo*, réputés pour être chronophages et coûteux.

Cette étude mériterait cependant d'être élargie à un panel plus large pour tenir compte des disparités individuelles de chacun (hydratation cutanée, âge, genre, ethnie, sensibilité, allergies...). De plus, il serait intéressant d'induire une irritation cutanée avec un protocole de frottement répété sur plusieurs jours. Ce protocole n'a pas pu être réalisé dans le cadre de la thèse.

5.3. Etude de l'irritation cutanée induite par le frottement répété de papiers en cellulose sur la peau : réflexion sur le frottement répété réalisé en « conditions humides »

En réalité, le frottement des papiers en cellulose contre la peau ne se fait pas en condition de frottement sec : il existe toujours un liquide à l'interface peau/papier. Dans cette partie, nous présentons notre réflexion pour aller vers un test de frottement répété se rapprochant plus des conditions réelles d'usage. Les résultats présentés sont issus de pré-tests et ne sauraient être généralisés à l'heure actuelle.

En raison de la durée des tests, nous avons choisi de réaliser cette pré-étude seulement sur un panel restreint, à savoir le groupe de femmes âgées de 20 à 29 ans, et pour les papiers en cellulose de douceurs extrêmes, BS1,5 et BS4,0.

5.3.1. Protocole expérimental

5.3.1.1. Frottement répété des papiers en cellulose : paramètres d'essai

Les conditions de frottement sont exactement les mêmes que dans le cas du frottement sec.

Le frottement répété des papiers en cellulose contre la peau a été réalisé avec le tribomètre rotatif présenté dans le chapitre 4.

5.3.1.2. Méthodes d'évaluation de l'irritation cutanée

Les techniques de mesure de l'irritation cutanée sont les mêmes que pour le frottement sec, à savoir :

- Le tewamètre pour la mesure de perte insensible en eau
- Le chromamètre pour la mesure de la rougeur
- Le laser Doppler pour l'évaluation du flux sanguin
- Le dispositif d'indentation sans contact pour les propriétés mécaniques de la peau

5.3.1.3. Etapes du protocole expérimental

Zones de mesures

Les papiers en cellulose ont été testés chacun sur une zone de peau différente. Le positionnement des zones est présenté en Figure 64. Le choix de la zone en fonction du papier en cellulose testé est fait de manière aléatoire et est différent pour chaque volontaire.

Une zone de contrôle a également été définie sur le bras gauche. Cette zone n'a subi aucune sollicitation.

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

Installation du volontaire

Tout d'abord, nous avons demandé au volontaire de ne pas utiliser de crème sur la zone de mesure 24h avant le test. Dans le cas de présence de poils dans la zone de peau utilisée pour la mesure, nous avons rasé la zone 24h avant le test.

Avant chaque série de mesures, le volontaire a respecté une période d'acclimatation de dix minutes minimum dans la salle de mesures, dont la température et l'humidité ont été fixées respectivement à $23\pm 2^\circ\text{C}$ et $55\pm 5\%$.

Pour éviter au maximum les mouvements du sujet au cours de l'essai, le volontaire est installé dans un fauteuil et son bras est maintenu par un dispositif de « repose-bras ».

Mesure des paramètres biophysiques et mécanique de la peau « saine » avant humidification

Dans un premier temps, nous avons évalué les paramètres biophysiques et mécanique de la peau « saine » avant frottement et avant humidification. Les paramètres mesurés sont les mêmes que dans le cas du frottement sec :

- Taux d'hydratation : 3 mesures
- Perte Insensible en Eau : 30 secondes de mesure
- Rougeur de la peau, valeur a^* : 3 mesures
- Flux sanguin : 1 minute de mesure
- Vitesse de propagation : 3 mesures

Humidification de la zone de peau d'intérêt

Dans la vie réelle, il existe un liquide à l'interface peau/papier. Ce liquide peut être plus ou moins acide ou basique. Nous avons choisi de commencer par seulement humidifier la peau avec différentes solutions de pH différents pour voir si cela avait un effet sur l'irritation cutanée engendrée. Nos tests étant menés *in vivo*, nous avons dû trouver des solutions acide et basique qui ne soient pas trop invasives pour la peau des sujets. Les solutions retenues sont : une solution d'eau citronnée (20ml de jus de citron par litre d'eau), de l'eau du robinet et une solution d'eau « salée » (concentration en sel : 20 g/L). La base de toutes les solutions est donc de l'eau, néanmoins, nous gardons en tête que l'ajout de jus de citron, qui contient du sucre, peut être à l'origine d'une modification des propriétés physico-chimiques de la surface cutanée, de même que le sel présent dans la solution salée. Pour limiter ces effets, nous avons essayé de réaliser des solutions assez diluées.

Pour humidifier la zone de peau, nous avons utilisé une compresse imbibée de solution liquide. Le pH des trois solutions testées sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Tableau des liquides utilisés avec leurs pH respectifs

Liquide	Citron (20ml de jus de citron par litre d'eau)	Eau du robinet	Eau « salée » (concentration en sel : 20 g/L)
pH	3,4	6,5	8,2

Nous avons découpé la compresse en un carré de 3 cm de côté. Celle-ci a ensuite été imbibée avec 10 cl de liquide. La compresse a ensuite été posée sur la zone de peau d'intérêt pendant 10 minutes.

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

Mesure des paramètres biophysiques et mécanique de la peau après humidification

Après la période d'humidification de la zone, nous avons retiré la compresse puis enlevé l'excédent éventuel de liquide avec un tissu doux pour la peau.

Puis, nous avons mesuré les paramètres biophysiques et mécanique de la peau :

- Taux d'hydratation : 3 mesures
- Perte Insensible en Eau : 30 secondes de mesure
- Rougeur de la peau, valeur a^* : 3 mesures
- Flux sanguin : 1 minute de mesure
- Vitesse de propagation : 3 mesures

Test de frottement

Le protocole de frottement est le même que dans le cas du frottement sec.

Mesure des paramètres biophysiques et mécanique de la peau après frottement répété

5 minutes après le test de frottement du papier en cellulose sur la zone de peau considérée, nous avons mesuré de nouveau les paramètres suivants :

- Taux d'hydratation : 3 mesures
- Perte Insensible en Eau : 30 secondes de mesure
- Rougeur de la peau, valeur a^* : 3 mesures
- Flux sanguin : 1 minute de mesure
- Vitesse de propagation : 3 mesures

Zones de contrôle

Pour vérifier que les mesures biophysiques ne sont pas influencées par des paramètres autres que l'irritation engendrée par le frottement répété, un contrôle est nécessaire. Pour cela, nous mesurons les paramètres biophysiques de la zone de peau servant de contrôle, en même temps que les zones de peau soumises au frottement répété. Pour cette étude, nous avons défini deux zones de contrôle. La première ne subit aucune sollicitation. La seconde subit l'étape d'humidification de la peau.

5.3.2. Résultats et Discussions

Nous présenterons dans un premier temps, l'évolution du taux d'hydratation suite à l'humidification par application du patch imbibé de liquide sur la peau, puis suite au frottement répété.

Nous nous intéresserons ensuite à l'évolution du coefficient de frottement en passant d'un contact sec à un contact humide et à l'effet du pH potentiel de la solution liquide.

Enfin, nous étudierons l'impact de l'application de liquide sur l'irritation cutanée.

5.3.2.1. Taux d'hydratation de la peau

La Figure 66 et la Figure 67 présentent les évolutions respectives du taux d'hydratation de la peau pour les papiers BS 1,5 et BS 4,0. On remarque que les valeurs initiales des taux d'hydratation sont semblables pour les deux papiers. Les écart-types sont principalement dus aux différences d'hydratation cutanée entre individus. Néanmoins, pour certains volontaires, on note une différence de taux d'hydratation en fonction de la zone de peau considérée, même si celles-ci sont spatialement proches. Suite à l'application du patch liquide sur la peau, on observe une augmentation importante du taux d'hydratation de la peau. En effet, l'hydratation augmente environ de 60 % pour les différents

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

liquides. Enfin, suite au frottement répété, le taux d'hydratation diminue sans atteindre sa valeur initiale. Le frottement répété a pour effet d'essuyer et de sécher la peau. Néanmoins, la peau reste humide après les 5 minutes de frottement. On remarque que le liquide n'a pas vraiment d'influence sur le taux d'hydratation de la peau. On observe aussi que les écart-types sont parfois importants. Bien que l'imbibition du patch et le frottement répété soient contrôlés, ils sont certainement à l'origine de ces écart-types.

On remarque qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux papiers testés : l'efficacité d'essuyage semble donc être la même avec les deux papiers.

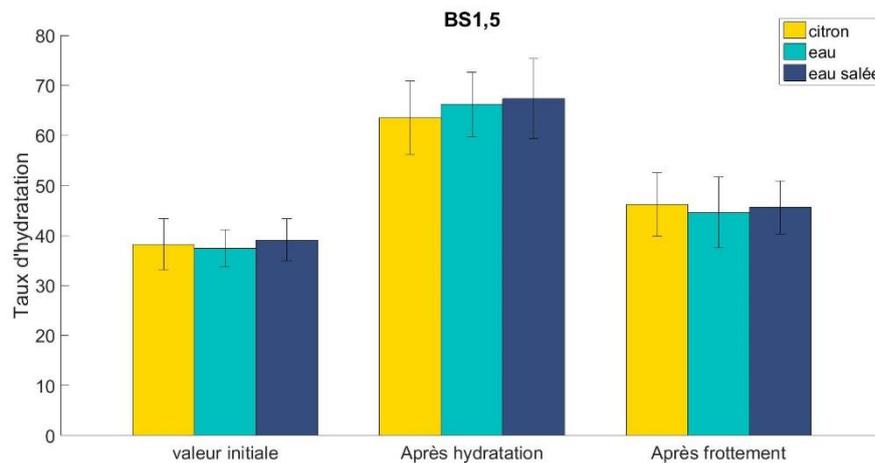


Figure 66 : Taux d'hydratation de la peau mesurée à $t=0$, après hydratation et après frottement du papier BS1,5 : comparaison avec les différents liquides utilisés pour l'humidification de la peau

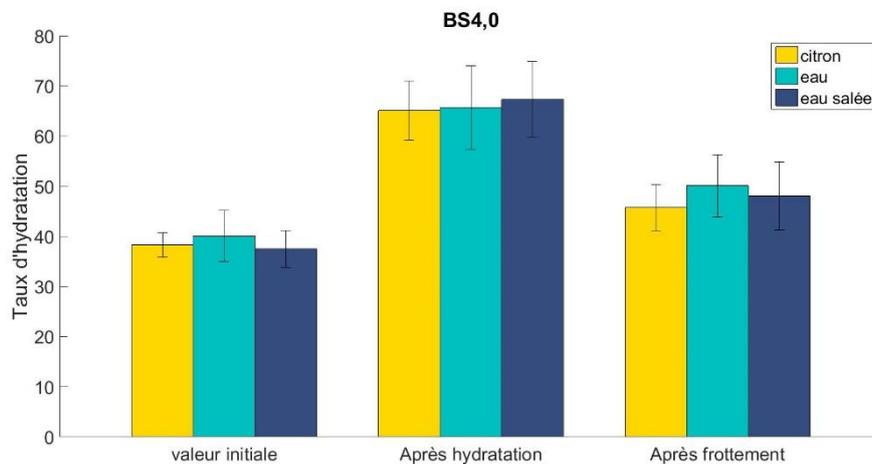


Figure 67 : Taux d'hydratation de la peau mesurée à $t=0$, après hydratation et après frottement du papier BS4,0 : comparaison avec les différents liquides utilisés pour l'humidification de la peau

5.3.2.2. Coefficients de frottement

Nous nous intéressons maintenant au frottement entre le papier et la peau en condition humide.

La Figure 68 présente les coefficients de frottement moyens obtenus pour les papiers BS1,5 et BS4,0 dans le cas du frottement sec et dans les différentes conditions d'humidification (eau citronné, eau, eau salée).

On remarque que les coefficients de frottement obtenus en condition de frottement sec sont significativement moins élevés que les coefficients de frottement en conditions humides. En effet on observe une augmentation de plus de 1,5 entre les coefficients de frottement sec et ceux obtenus en

conditions humides. Si l'on compare avec les résultats obtenus en termes d'hydratation cutanée, on remarque que l'augmentation d'environ 60% de l'hydratation de la peau engendre une augmentation de presque 70% du coefficient de frottement.

L'effet de l'hydratation de la peau sur le coefficient de frottement de la peau a été étudié à plusieurs reprises [180]. Il a été montré que le coefficient de frottement augmentait d'un facteur allant de 1,5 à 7 en passant de conditions de frottement sec à des conditions humides [158], [217], [218]. Ce facteur dépend en particulier du temps d'attente entre le moment d'humidification de la peau et le début du test de frottement. En particulier, Gerhardt *et al.* ont trouvé une relation linéaire entre le coefficient de frottement et son taux d'hydratation [184]. Différentes hypothèses ont été avancées pour expliquer ce phénomène lié à l'hydratation de la peau. Certains auteurs l'expliquent par un gonflement et un ramollissement du *stratum corneum* suite à l'hydratation de la peau [184], [191], [219], d'autres par une augmentation des forces d'adhésion capillaire entre le frotteur et la surface de la peau induisant une aire de contact réelle plus importante [220].

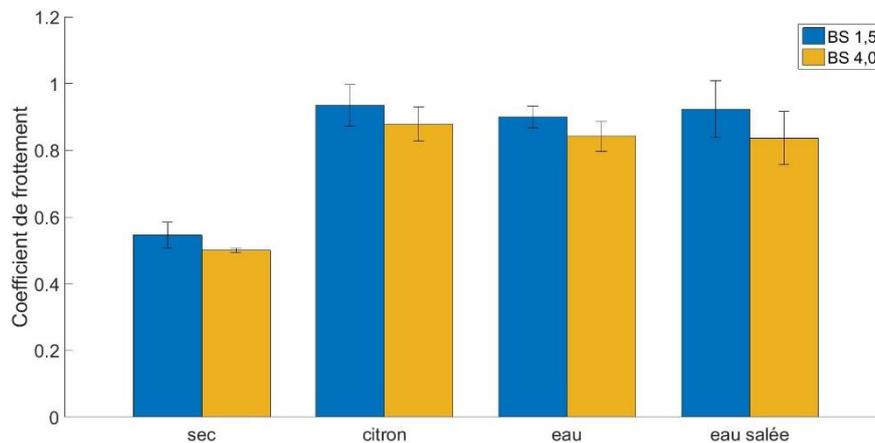


Figure 68 : Comparaison des coefficients de frottement pour les papiers en cellulose BS1,5 et BS4,0 dans les différentes conditions du protocole

Le ramollissement du *stratum corneum* est visible à travers l'augmentation de l'enfoncement de la peau suite à un test d'impact d'air. La Figure 69 représente les courbes de déformation de la peau suite à un test d'impact sur la peau sèche et la peau humidifiée par les différentes solutions. On remarque en effet que la déformation de la peau est environ deux fois plus importante lorsque la peau a été humidifiée. L'application de la compresse imbibée de solution a donc hydraté le *stratum corneum*, ce qui se traduit par un ramollissement de la peau et donc une adhésion plus importante lors du contact peau/papier. Ce qui explique l'augmentation du frottement peau/papier après humidification de la peau par une solution liquide.

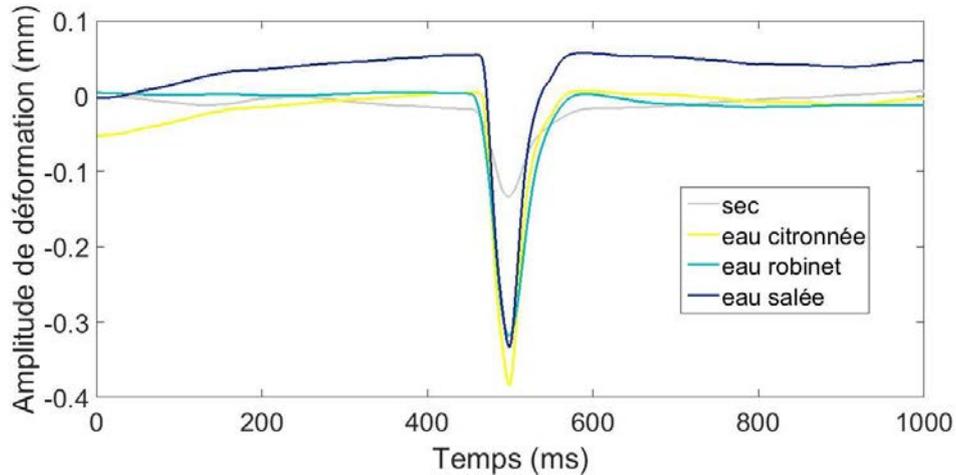


Figure 69 : Représentation de l'enfoncement de la peau suite à un impact d'air dans le cas d'une peau sèche et humidifiée avec les différentes solutions : eau citronnée, eau du robinet et eau salée

Si on s'intéresse à l'effet du liquide sur le coefficient de frottement, on remarque qu'il n'y a pas de différence significative entre les différents liquides. En effet, on trouve un coefficient de frottement autour de 0,92 pour le papier BS 1,5 et un coefficient autour de 0,84 pour le papier BS 4,0. Bien que les solutions soient un peu différentes en termes de composition, elles sont toutes principalement à base d'eau. Elles ont donc pour principal effet d'hydrater le *stratum corneum* et donc d'augmenter le frottement à l'interface peau/papier. Il est fort probable que le résultat soit différent si on utilisait de l'huile comme liquide à l'interface.

5.3.2.3. Evolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau suite au frottement répété en conditions humides

Nous venons de montrer que l'application des solutions liquides (utilisées dans l'étude) sur la peau avant frottement avait pour conséquence d'augmenter drastiquement le coefficient de frottement entre la peau et le papier en cellulose. De plus, nous avons montré que la nature du liquide, dans le cadre de nos essais, n'avait pas d'effet significatif sur ce coefficient de frottement.

Dans cette partie, nous souhaitons déterminer si cette augmentation de coefficient de frottement entraîne aussi une augmentation de l'irritation cutanée et si le pH du liquide influence cette irritation.

La Figure 70 et la Figure 71 présentent les taux de variation des paramètres biophysiques (flux sanguin, rougeur, perte insensible en eau) et mécanique (module de Young) dans les différentes conditions de frottement (sec, eau citronnée, eau, eau salée). La Figure 70 montre les résultats obtenus suite au frottement avec le papier en cellulose le moins doux, BS 1,5. La Figure 71 concentre les résultats obtenus pour le papier le plus doux, BS 4,0.

On peut globalement faire les mêmes observations pour les deux papiers en cellulose. Comme pour le frottement à sec, on constate une diminution du module de Young et une augmentation du flux sanguin, de la rougeur et de la perte insensible en eau. En ce qui concerne le flux sanguin et la rougeur de la peau, aucune différence significative entre les différentes conditions de frottement n'est observée (BS 1,5 : $p=0,84$ pour le flux sanguin et $p=0,81$ pour la rougeur ; BS 4,0 : $p=0,95$ et $p=0,88$). Concernant le module de Young, il subit une diminution plus importante suite à un frottement en conditions humides. Toutefois, le type de liquide ne semble pas avoir une influence sur sa diminution. Pederson *et al.* ont étudié l'effet de l'hydratation sur les propriétés du *stratum corneum* [221]. Ils ont conclu que ses propriétés mécaniques étaient majoritairement influencées par son hydratation. En effet, l'hydratation cutanée est connue pour « ramollir » le *stratum corneum*, d'où la diminution de son module de Young (Figure 69). Ainsi, le module de Young que l'on mesure résulte à la fois de l'hydratation de la peau et de la dégradation de la couche cornée par frottement répété. Il est donc

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

difficile de connaître la contribution exacte de l'hydratation et de l'irritation par frottement. Enfin, la perte insensible en eau est largement augmentée dans des conditions de frottement humide. En effet, son taux d'augmentation est presque deux fois plus important pour le frottement humide. On remarque également une différence significative entre les différents liquides : la perte insensible en eau est plus élevée pour le citron. Toutefois, nos mesures révèlent une augmentation importante de la perte insensible en eau suite à l'application du patch imbibé (avant frottement répété). Il est donc possible que la mesure de la perte insensible en eau soit largement influencée par l'humidification de la peau.

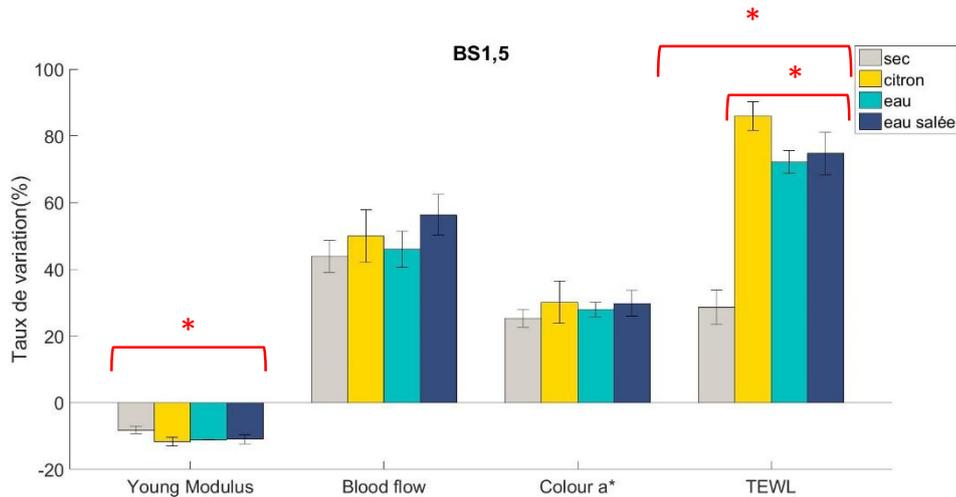


Figure 70 : Taux de variation des paramètres biophysiques et mécanique de la peau après frottement répété du papier BS1,5, dans les différentes conditions d'humidification de la peau (l'étoile * indique une différence significative au risque 5% entre les groupes sous l'accolade)

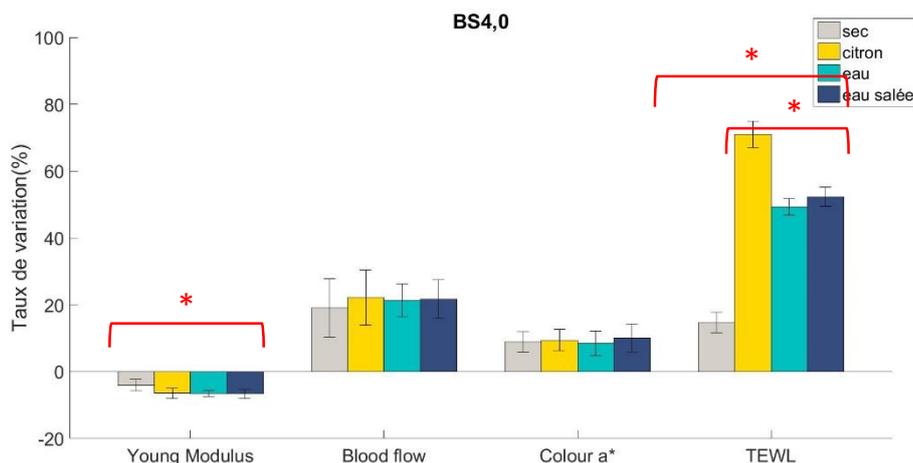


Figure 71 : Taux de variation des paramètres biophysiques et mécanique de la peau après frottement répété du papier BS4,0, dans les différentes conditions d'humidification de la peau (l'étoile * indique une différence significative au risque 5% entre les groupes sous l'accolade)

Pour finir, la comparaison des résultats obtenus pour les deux papiers en cellulose montre que les réactions cutanées induites par le frottement répété en condition humide sont plus importantes pour le papier le moins doux, BS 1,5.

5.3.3. Conclusion

L'objectif de cette pré-étude était de réfléchir à comment mimer au mieux les conditions réelles d'usage des papiers en cellulose par le consommateur. Notamment, on souhaitait évaluer l'influence de la présence de liquide (et de son caractère acido-basique) sur l'irritation de la peau.

Pour cela nous avons mis en place un protocole d'humidification contrôlée de la peau de l'avant-bras avant frottement. Nous avons utilisé les techniques d'évaluation des réactions cutanées employées pour les tests de frottement à sec.

Les premiers résultats montrent que l'humidification de la peau a un effet important sur le coefficient de frottement entre les papiers en cellulose et la peau. En effet, le coefficient de frottement est multiplié par 1,5 par rapport à un frottement sec. Néanmoins, nous avons vu que l'augmentation de ce coefficient de frottement n'engendrait pas systématiquement une augmentation des réactions cutanées. En effet, la rougeur de la peau et son flux sanguin ne semblent pas être différents en conditions humides. Au contraire, on observe une diminution plus importante du module de Young et une augmentation plus importante de la perte insensible en eau. Cependant, il est difficile de dissocier l'effet de l'hydratation et l'effet du frottement sur la diminution totale du module de Young.

Lors de nos tests, nous avons recueilli à l'oral le ressenti des volontaires. Ils s'accordent tous pour dire que l'inconfort était plus important en condition humide, en particulier pour le citron, certainement à cause de la réaction de l'acidité sur la peau lésée.

En conclusion, il semble que le frottement de la peau contre des papiers en cellulose en conditions humides soit un problème complexe qui fait intervenir trois corps (la peau, le papier et le liquide à l'interface). Les principales difficultés du test en conditions humides sont :

- L'humidité de la peau qui n'est pas la même pendant toute la durée du test : en effet, l'évaporation naturelle associée au séchage de la peau, par frottement de papier, diminue l'hydratation du *stratum corneum* au cours du temps.
- Le choix des solutions liquides qui ne doivent pas être trop invasives pour la peau des sujets. Ceci nous a particulièrement limité car les solutions trop basiques ou acides sont nocives pour la peau.
- La durée importante des tests qui limite le nombre de sujets possible.
- Les techniques d'évaluation de l'irritation qui ne sont pas vraiment adaptées aux conditions humides. Ainsi, il est impossible de dissocier les effets de l'hydratation et du frottement sur les réactions mesurées.
- Le test qui est long et contraignant pour le sujet. Nous avons donc choisi de limiter la pré-étude à un panel réduit (femmes âgées de 20 à 29 ans) et à seulement deux papiers en cellulose. Il serait intéressant de l'appliquer sur l'ensemble du panel de volontaires, avec l'ensemble des papiers en cellulose.

5.4. Conclusion sur le chapitre

Ce dernier chapitre avait pour objectif d'évaluer les réactions cutanées engendrées par le frottement répété des papiers en cellulose sur la peau, dans différentes conditions. La première partie était réservée au frottement à sec. Nous avons montré que le frottement répété de papiers en cellulose sur la peau engendrait une irritation cutanée, visible à travers une diminution du module de Young du *stratum corneum* et une augmentation de la rougeur, du flux sanguin et de la perte insensible en eau de la peau. Ces mêmes effets ont été observés dans le cas d'un frottement en conditions humides. Toutefois, les techniques de mesures biophysiques et mécanique semblent plus adaptées à des évaluations en conditions de frottement sec. L'étude en conditions humides mériterait d'être approfondie. Il serait essentiel, dans un premier temps, de comprendre l'effet des différentes solutions sur les propriétés physico-chimiques de la surface de la peau. Ensuite, il faudrait affiner le protocole pour permettre de mieux contrôler l'humidité de la peau au cours du test. Enfin, le test doit être élargi à l'ensemble du panel et des papiers en cellulose.

Chapitre 5 Evaluation expérimentale de l'irritation cutanée induite par le frottement répété des papiers en cellulose : incidence des conditions de frottement

Pour conclure, nous avons montré que le paramètre le plus important pour assurer un confort optimal aux utilisateurs, était la douceur du papier en cellulose. Cette douceur est représentée par la mesure du niveau vibratoire du papier en cellulose avec le doigt artificiel. Plus ce niveau vibratoire est élevé, moins le papier est doux et plus il sera potentiellement inconfortable et irritant pour la peau. Nous avons néanmoins mis en évidence le rôle de la pilosité des papiers sur l'irritation cutanée. Il serait donc intéressant d'approfondir l'étude dans cette direction. Par exemple, on pourrait utiliser deux papiers de même douceur mais avec différents grades de pilosité / rugosité.

Par manque de temps, nous ne nous sommes pas intéressés à l'évaluation biologique/biochimique de l'irritation par frottement répété. Il serait intéressant de combiner nos méthodes biophysiques à d'autres techniques, notamment pour étudier la modification des lipides cutanés (par spectroscopie Raman par exemple) et protéines suite à un frottement répété.

Conclusion générale

L'objectif de cette étude était multiple :

- Evaluer la qualité tactile des papiers en cellulose de manière quantitative, répétable et rapide
- Caractériser l'irritation cutanée induite par un frottement répété sur la peau
- Etudier le lien entre qualité tactile d'un papier en cellulose et le confort du consommateur lors d'une utilisation répétée

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose. Pour cela, nous avons développé deux dispositifs de frottement : un dispositif de doigt humain instrumenté et un doigt artificiel permettant de mesurer le coefficient de frottement du doigt sur la surface du papier et le niveau acoustique généré lors de ce frottement. Les résultats ont montré qu'il était possible de décomposer la qualité tactile d'un papier en cellulose selon deux aspects : sa douceur et sa pilosité de surface. Ces deux caractéristiques sensorielles peuvent être évaluées à partir des mesures de coefficients de frottement et de niveaux acoustiques. En effet, nous avons vu que le niveau acoustique était un bon marqueur de la douceur du papier en cellulose et que le coefficient de frottement était relié à sa pilosité. Ces résultats majeurs nous ont permis d'avoir une méthode d'évaluation quantitative de la qualité tactile d'un papier en cellulose. Il s'agit d'une méthode simple, rapide et reproductible qui a son intérêt pour l'industrie papetière qui, jusque-là, utilisaient des panels sensoriels onéreux et chronophage pour évaluer la qualité sensorielle de ses papiers.

Dans un second temps, nous avons étudié l'interaction des papiers en cellulose avec la peau et l'irritation cutanée induite suite à un frottement répété. Cette partie a été décomposée en trois chapitres.

Nous avons d'abord réalisé un état de l'art des différentes techniques biophysiques d'évaluation de l'irritation cutanée. Afin d'apporter une amélioration de la compréhension de cette irritation, nous avons développé un dispositif de caractérisation mécanique de la peau. Ce dispositif s'inspire des techniques d'ophtalmologie pour caractériser la tension de l'œil. Le principe consiste à envoyer un jet d'air à la surface de la peau. La déformation cutanée induite par le jet d'air crée une onde de surface, dont la vitesse de propagation dépend des propriétés mécaniques de la peau dans laquelle elle se propage. Nous avons montré que ce dispositif d'indentation sans contact était sensible aux modifications des propriétés mécaniques de la peau dues au vieillissement et à l'altération du *stratum corneum*, suite à un test de « tape stripping ». A l'issue de ce chapitre, nous avons choisi les techniques que nous souhaitions utiliser pour l'évaluation de l'irritation cutanée suite à un essai de frottement répété des papiers en cellulose sur la peau.

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'étude des propriétés tribologiques de l'interaction peau/papier en cellulose en fonction de l'âge et du genre du volontaire et du type de papier en cellulose (douceur, pilosité). Pour cela, nous avons utilisé un tribomètre rotatif permettant de reproduire des conditions de frottement proche de la réalité d'usage des papiers. Les mesures ont été réalisées *in vivo* sur un panel de 59 volontaires. Nous avons montré que le coefficient de frottement peau/papier était indépendant de l'âge de la peau. Ce résultat a en partie été expliqué par l'augmentation du terme de déformation et la diminution du terme d'adhésion du coefficient de frottement total, avec le vieillissement de la peau. Ces deux effets antagonistes sont en partie responsables de l'indépendance du coefficient de frottement vis-à-vis du processus de vieillissement. Les résultats ont, également, montré que les caractéristiques sensorielles du papier en cellulose avaient un effet significatif sur les valeurs du coefficient de frottement et du niveau vibratoire induit lors du frottement sur la peau. En effet, nous avons observé les mêmes tendances que pour l'étude du chapitre 2 : le coefficient de frottement augmente avec la pilosité et le niveau vibratoire diminue avec la douceur du papier. Cette conclusion nous a ainsi amenés à penser que les caractéristiques

sensorielles du papier avaient un impact sur le potentiel inconfort et l'irritation cutanée suite à un frottement répété.

La vérification de cette hypothèse a fait l'objet du dernier chapitre. Dans ce dernier, nous avons réalisé une étude *in vivo* sur le même panel de volontaires. L'étude a consisté à évaluer les réactions cutanées engendrées par un frottement de 5 minutes d'un papier en cellulose sur la peau. L'irritation cutanée a été quantifiée grâce à la mesure de la perte insensible en eau, de la rougeur, du flux sanguin et du module de Young de la peau avant et après le test de frottement. Nous avons observé que le frottement répété de tous les papiers en cellulose engendrait une augmentation de la perte insensible en eau, de la rougeur et du flux sanguin, et une diminution du module de Young de la peau. Néanmoins, nous avons montré que ce frottement répété engendrait l'apparition de réactions cutanées plus ou moins importantes suivant la qualité tactile du papier en cellulose. En particulier, les papiers en cellulose présentant une douceur importante (niveau vibratoire faible) sont ceux qui entraînent le moins d'irritation de la peau et d'inconfort. De plus, nous avons remarqué que la tendance était la même quelque-soit l'âge ou le sexe du volontaire.

Une réflexion a également été menée sur le frottement répété en conditions humides. Cette partie ne constitue qu'une première étape vers une compréhension plus poussée de l'irritation de la peau lors d'un usage en conditions réelles des papiers en cellulose. Néanmoins, il apparaît que l'ajout de solution liquide à l'interface peau/papier engendre un frottement plus important et potentiellement une irritation et un inconfort plus élevés également.

En conclusion, nous avons montré que le papier le plus doux était celui qui irritait le moins et qui était le plus confortable à l'usage. Pour les industriels, ce résultat est plutôt rassurant. Mais au-delà du résultat, c'est surtout la méthode utilisée qui a toute son importance. En effet, nous avons observé une très bonne corrélation entre les paramètres physiques (coefficient de frottement et niveaux acoustiques) mesurés avec le doigt artificiel et ceux mesurés *in vivo*, en contact avec la peau (coefficients de frottement et niveaux vibratoires). Ainsi, une simple mesure tribo-acoustique avec le doigt artificiel pourrait permettre d'avoir un classement des papiers en cellulose selon leur inconfort à l'usage présumé. Il serait ainsi possible d'éliminer les papiers en cellulose ayant un niveau vibratoire au-dessus d'une certaine limite (donc potentiellement plus inconfortable et irritant). Cela permettrait ainsi un gain de temps considérable pour les industriels qui n'auraient plus besoin de faire une étude consommateur sur des centaines de produits.

Ce travail a donc permis de développer de nouvelles méthodes d'évaluation de la qualité tactile des papiers en cellulose et de caractérisation de l'irritation cutanée induite par un frottement répété sur la peau. Les résultats obtenus concernent les feuilles de base en cellulose destinées ensuite à être transformées en produits finis. Cette première étape était essentielle puisqu'une grande partie de la qualité tactile des produits finis est due à celle de la feuille de base. Néanmoins, il est essentiel d'étendre l'étude aux structures papiers plus complexes tels que les mouchoirs et les papiers hygiéniques. En effet, pour ces produits, d'autres aspects doivent être pris en compte tels que leurs épaisseurs et l'ajout de produits chimiques.

D'autre part, la majorité de nos résultats concernent le frottement sec. Nos essais réalisés en conditions de frottement humide ont montré une augmentation des réactions cutanées par rapport au frottement sec. Seulement, cette étude n'a pu être réalisée que sur quelques volontaires. Il serait donc intéressant de poursuivre les recherches sur un panel plus important et d'améliorer le protocole expérimental.

Enfin, nos résultats ont montré que l'âge du volontaire n'avait pas d'influence sur les réactions cutanées induites suite au frottement répété. Néanmoins, notre intervalle d'âges considérés ne tenait compte ni des enfants ou bébés, ni des personnes très âgées. Il me semble donc pertinent d'étendre l'étude à ce type de personnes, pour lesquelles on pourrait avoir des différences plus significatives.

Annexes

Tableau 12 : Taux d'évolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau pour le papier en cellulose
BS1,5

		Module de Young	Flux sanguin	Couleur	Perte insensible en eau
Hommes	20-29 ans	-8,64±1,50	41,0±6,0	20,1±5,2	25,3±4,6
	30-39 ans	-8,10±1,04	39,4±8,4	34,7±5,1	19,1±6,1
	40-49 ans	-7,68±1,51	44,9±8,6	39,7±4,9	25,0±5,1
	>50 ans	-8,01±0,86	39,8±7,3	36,7±5,3	24,3±4,1
Femmes	20-29 ans	-8,28±1,16	43,9±4,8	25,3±2,6	28,6±5,2
	30-39 ans	-8,86±0,95	45,6±6,9	31,1±4,1	26,0±7,1
	40-49 ans	-8,96±1,08	41,7±6,1	23,7±8,1	23,9±5,9
	>50 ans	-9,01±1,42	41,3±4,9	23,5±4,6	21,8±6,4

Tableau 13 : Taux d'évolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau pour le papier en cellulose
BS2,0

		Module de Young	Flux sanguin	Couleur	Perte insensible en eau
Hommes	20-29 ans	-7,50±0,87	38,9±3,2	17,8±7,1	17,4±4,9
	30-39 ans	-7,52±1,10	32,4±6,7	27,8±8,9	16,7±7,8
	40-49 ans	-8,17±1,06	37,6±6,2	34,0±8,5	21,7±7,1
	>50 ans	-7,23±1,21	37,4±4,9	29,6±4,6	26,5±3,7
Femmes	20-29 ans	-8,07±1,17	36,9±5,2	15,9±2,6	16,8±5,1
	30-39 ans	-8,29±0,95	37,8±4,8	22,7±8,3	23,5±3,6
	40-49 ans	-7,45±1,62	34,6±7,1	17,6±4,9	24,0±9,3
	>50 ans	-7,98±1,06	38,4±5,3	19,3±5,9	25,4±6,

Tableau 14 : Taux d'évolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau pour le papier en cellulose
BS2,5

		Module de Young	Flux sanguin	Couleur	Perte insensible en eau
Hommes	20-29 ans	-7,03±1,11	30,5±6,8	13,2±3,5	16,4±6,2
	30-39 ans	-6,95±1,40	27,6±5,4	27,3±7,2	12,5±5,4
	40-49 ans	-6,13±1,32	29,3±4,1	21,4±3,7	15,2±4,9
	>50 ans	-6,84±1,60	32,1±3,9	18,6±3,5	19,7±5,8
Femmes	20-29 ans	-5,87±1,21	27,52±5,3	17,4±2,7	22,7±3,3
	30-39 ans	-7,10±1,87	31,2±7,2	23,6±6,1	19,5±5,1
	40-49 ans	-7,34±1,15	28,1±5,8	18,9±5,1	20,3±6,7
	>50 ans	-7,01±1,79	31,4±6,7	18,1±7,3	17,6±4,8

Tableau 15 : Taux d'évolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau pour le papier en cellulose
BS3,0

		Module de Young	Flux sanguin	Couleur	Perte insensible en eau
Hommes	20-29 ans	-6,01±0,89	20,5±8,4	10,8±4,1	12,4±5,1
	30-39 ans	-6,16±0,91	20,3±4,1	17,6±7,5	10,3±3,7
	40-49 ans	-6,21±1,20	24,7±7,4	12,1±6,4	13,4±3,5
	>50 ans	-6,35±1,35	23,6±4,8	13,1±5,7	17,3±7,4
Femmes	20-29 ans	-6,08±0,95	20,45±4,5	16,1±3,6	11,8±5,1
	30-39 ans	-6,35±1,36	29,4±6,3	14,3±6,2	16,1±6,4
	40-49 ans	-6,12±1,81	22,3±7,1	15,4±4,8	15,9±8,1
	>50 ans	-6,54±1,23	26,6±3,9	13,8±4,9	18,1±5,7

Tableau 16 : Taux d'évolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau pour le papier en cellulose
BS3,5

		Module de Young	Flux sanguin	Couleur	Perte insensible en eau
Hommes	20-29 ans	-5,74±1,08	19,2±5,3	5,2±2,8	11,8±3,7
	30-39 ans	-5,41±1,35	20,1±6,8	10,3±6,3	9,1±4,5
	40-49 ans	-5,53±0,83	25,1±7,4	9,3±3,2	11,8±6,1
	>50 ans	-5,78±1,04	21,3±6,7	8,3±3,1	12,3±3,9
Femmes	20-29 ans	-5,61±0,93	18,73±9,6	7,2±6,1	15,9±3,6
	30-39 ans	-6,02±1,40	28,7±8,4	7,2±3,5	11,6±4,6
	40-49 ans	-5,32±1,70	20,0±4,6	10,2±6,2	16,2±4,7
	>50 ans	-6,07±1,53	22,7±4,1	6,2±4,1	16,7±3,9

Tableau 17 : Taux d'évolution des paramètres biophysiques et mécanique de la peau pour le papier en cellulose
BS4,0

		Module de Young	Flux sanguin	Couleur	Perte insensible en eau
Hommes	20-29 ans	-3,15±1,05	16,8±6,1	4,3±2,4	9,7±3,6
	30-39 ans	-4,20±1,23	18,3±7,1	8,1±3,8	8,4±3,5
	40-49 ans	-3,91±1,70	21,3±3,5	7,6±3,7	10,1±4,2
	>50 ans	-4,48±1,12	18,5±5,2	7,4±4,2	10,8±5,8
Femmes	20-29 ans	-4,08±1,75	19,1±9,6	8,9±5,3	14,7±7,1
	30-39 ans	-4,15±1,64	23,4±5,2	5,4±2,6	10,2±4,7
	40-49 ans	-3,95±1,41	20,1±7,3	9,6±5,7	13,7±6,4
	>50 ans	-4,35±1,47	22,5±6,2	6,2±3,5	13,0±5,2

Références

- [1] J. Meynadier, *Précis de physiologie cutanée.* .
- [2] P. Agache, *Physiologie de la peau et explorations fonctionnelles cutanées*, Editions m. Cachan, 2000.
- [3] A. Melissopoulos, *La peau : structure et physiologie*, Lavoisier . Paris, 2012.
- [4] J. Levin and H. Maibach, “Human skin buffering capacity: an overview.,” *Ski. Res. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 121–6, May 2008.
- [5] L. Eckhart, S. Lippens, E. Tschachler, and W. Declercq, “Cell death by cornification.,” *Biochim. Biophys. Acta*, vol. 1833, no. 12, pp. 3471–80, Dec. 2013.
- [6] P. Elias, “Epidermal lipids, barrier function, and desquamation.,” *J Invest Dermatol*, vol. 80, pp. 44–49, 1983.
- [7] G. K. Menon, G. W. Cleary, and M. E. Lane, “The structure and function of the stratum corneum.,” *Int. J. Pharm.*, vol. 435, no. 1, pp. 3–9, Oct. 2012.
- [8] A. S. Michaels, S. K. Chandrasekaran, and J. E. Shaw, “Drug permeation through human skin: theory and in vitro experimental measurement,” *AICHE J.*, vol. 21, no. 5, pp. 985–996, 1975.
- [9] A. Gillet, “Etude de l'intérêt de l'utilisation de systèmes vésiculaires associés à une molécule active dans le but d'une application dermatologique,” Université de Liège, 2011.
- [10] T. T. Sun and H. Green, “Keratin filaments of cultured human epidermal cells. Formation of intermolecular disulfide bonds during terminal differentiation,” *J. Biol. Chem.*, vol. 253, no. 6, pp. 2053–2060, 1978.
- [11] O. Bousquet and P. a. Coulombe, “Les kératines : un autre regard sur la biologie de la peau,” *Médecine/Sciences*, vol. 18, no. 1, pp. 45–54, Jan. 2002.
- [12] H. Schaefer, *Skin barrier: principles of percutaneous absorption*, Karger. Basel, 1996.
- [13] C. Caubet, N. Jonca, M. Brattsand, M. Guerrin, D. Bernard, R. Schmidt, M. Simon, and G. Serre, “Degradation of corneodesmosome proteins by two serine proteases of the kallikrein family, SCTE/KLK5/hK5 and SCCE/KLK7/hK7.,” *J Invest Dermatol*, vol. 122, no. 5, pp. 1235–1244, 2004.
- [14] P. Descargues, C. Deraison, C. Bonnart, and A. Hovnanian, “Spink5-deficient mice mimic Netherton syndrome through degradation of desmoglein 1 by epidermal protease hyperactivity,” *Nat. Genet.*, vol. 37, no. 1, pp. 56–65, 2005.
- [15] J. Bouwstra, G. Gooris, and M. Ponc, “The Lipid Organisation of the Skin Barrier : Liquid and Crystalline Domains Coexist in Lamellar Phases,” *J. Biol. Phys.*, vol. 28, pp. 211–223, 2002.

- [16] J. A. Bouwstra, F. Dubbelaar, G. Gooris, and M. Ponc, "The lipid organisation in the skin barrier.," *Acta Derm Venereol Suppl*, vol. 208, pp. 23–30, 2000.
- [17] T. Marshall and I. City, "Lipid and protein structures in the permeability barrier of mammalian epidermis," *J. Lipid*, vol. 33, 1992.
- [18] S. Y. E. Hou, A. K. Mitra, S. H. White, G. K. Menon, R. Ghadially, and P. . Elias, "Membrane structures in normal and essential fatty acid-deficient stratum corneum : characterization by ruthemium tetroxide staining and X-ray diffraction," *J Invest*, vol. 96, pp. 215–223, 1991.
- [19] K. C. Madison, D. C. Swartzendruber, P. W. Wertz, and D. T. Downing, "Presence of Intact Intercellular Lipid Lamellae in the Upper Layers of the Stratum Corneum," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 88, no. 6, pp. 714–718, Jun. 1987.
- [20] J.-C. Garson, J. Doucet, J.-L. Lévêque, and G. Tsoucaris, "Oriented Structure in Human Stratum Corneum Revealed by X-Ray Diffraction," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 96, no. 1, pp. 43–49, Jan. 1991.
- [21] S. H. White, D. Mirejovsky, and G. I. King, "Structure of lamellar lipid domains and corneocyte envelopes of murine stratum corneum. An x-ray diffraction study," *Biochemistry*, vol. 27, no. 10, pp. 3725–3732, 1988.
- [22] J. A. Bouwstra, G. S. Gooris, M. A. Salomons-de Vries, and W. Bras, "Structure of human stratum corneum as a function of temperature and hydration: A wide-angle X-ray diffraction study," *Int. J. Pharm.*, vol. 84, no. 3, pp. 205–216, 1992.
- [23] J. a Bouwstra, G. S. Gooris, J. a van der Spek, and W. Bras, "Structural Investigations of Human Stratum Corneum by Small-Angle X-Ray Scattering," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 97, no. 6, pp. 1005–1012, Dec. 1991.
- [24] A. Pouillot, "The Stratum Corneum: A Double Paradox," *J. Cosmet. Dermatol.*, vol. 7, no. 2, pp. 143–148, 2008.
- [25] A. W. Kenneth and S. R. Michael, "The structure and function of the skin," in *Dermatological and transdermal formulation*, CRC Press., New-York, 2002, pp. 1–40.
- [26] P. Kaur and a Li, "Adhesive properties of human basal epidermal cells: an analysis of keratinocyte stem cells, transit amplifying cells, and postmitotic differentiating cells.," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 114, no. 3, pp. 413–20, Mar. 2000.
- [27] R. E. Burgeson and A. M. Christianot, "The dermal-epidermal junction," *Curr. Opin. cell Biol.*, vol. 9, pp. 651–658, 1997.
- [28] L. Borradori and a Sonnenberg, "Structure and function of hemidesmosomes: more than simple adhesion complexes.," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 112, no. 4, pp. 411–8, Apr. 1999.
- [29] M. Démarchez, "Le derme," *Biologie de la peau*, 2011. [Online]. Available: <http://biologiedelapeau.fr/>. [Accessed: 29-Nov-2016].

- [30] G. Boyer, “Modelisation du comportement mecanique de la peau humaine in vivo : application au vieillissement et aux gestes du clinicien.,” Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2010.
- [31] S. Ellero-Simatos, “L’hypoderme,” *Biologie de la peau*, 2013. [Online]. Available: <http://biologiedelapeau.fr/spip.php?article28>. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [32] S. Gohin, “Mécanismes de défense de la peau : rôle des interactions neurovasculaires,” Université Claude Bernard - Lyon 1, 2013.
- [33] I. M. Braverman, “The cutaneous microcirculation.,” *J. Investig. dermatology. Symp. Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 3–9, Dec. 2000.
- [34] K. C. Madison, “Barrier function of the skin: ‘la raison d’être’ of the epidermis.,” *J. Invest. Dermatol.*, vol. 121, no. 2, pp. 231–41, Aug. 2003.
- [35] P. Robert, *Dermopharmacologie clinique*, Edisem. Sainte-Hyacinthe, 1985, p. 313.
- [36] R. K. Freinkel, *The biology of the skin*, CRC Press. New-York, 2001.
- [37] M.-C. Martini, *Introduction à la dermatopharmacie et à la cosmétologie*, LAVOISIER. Cachan, 2016.
- [38] J. van Smeden, M. Janssens, G. S. Gooris, and J. a Bouwstra, “The important role of stratum corneum lipids for the cutaneous barrier function.,” *Biochim. Biophys. Acta*, vol. 1841, no. 3, pp. 295–313, Mar. 2014.
- [39] K. R. Feingold and P. M. Elias, “Role of lipids in the formation and maintenance of the cutaneous permeability barrier.,” *Biochim. Biophys. Acta*, vol. 1841, no. 3, pp. 280–94, Mar. 2014.
- [40] M. Reynier and M. Simon, “L’épiderme : une barrière sur tous les fronts,” *Biologie de la peau*, 2016. [Online]. Available: <http://biologiedelapeau.fr/spip.php?article84#Madison>, 2003. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [41] N. Kirschner and J. M. Brandner, “Barriers and more: functions of tight junction proteins in the skin.,” *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 1257, pp. 158–66, Jun. 2012.
- [42] A. V Rawlings and P. J. Matts, “Stratum corneum moisturization at the molecular level: an update in relation to the dry skin cycle.,” *J. Invest. Dermatol.*, vol. 124, no. 6, pp. 1099–110, Jun. 2005.
- [43] E. Candi, R. Schmidt, and G. Melino, “The cornified envelope: a model of cell death in the skin.,” *Nat Rev Mol Cell Biol*, vol. 6, no. 4, pp. 238–240, 2005.
- [44] S. J. Brown and W. H. I. Mclean, “Europe PMC Funders Group One remarkable molecule : Filaggrin,” *J Invest Dermatol*, vol. 132, pp. 751–762, 2012.

- [45] A. Ishida-Yamamoto, S. Igawa, and M. Kishibe, "Order and disorder in corneocyte adhesion.," *J. Dermatol.*, vol. 38, no. 7, pp. 645–54, Jul. 2011.
- [46] J. M. Schöder and J. Harder, "Peptides antimicrobiens naturels cutanés," *médecine Sci.*, vol. 22, no. 2, pp. 153–157, 2006.
- [47] R. Gläser, J. Harder, H. Lange, J. Bartels, E. Christophers, and J. Schröder, "Antimicrobial psoriasin (S100A7) protects human skin from *Escherichia coli* infection," *Nat Immunol*, vol. 6, no. 1, pp. 57–64, 2005.
- [48] N. Boulais and L. Misery, "The epidermis : a sensory tissue," *Eur J Dermatol*, vol. 18, no. April, pp. 119–127, 2008.
- [49] L. Misery, "The interaction between skin and nervous system," *G Ital Dermatol Venerol*, vol. 140, pp. 677–684, 2005.
- [50] M. Démarchez, "Le système nerveux cutané," *Biologie de la peau*, 2015. [Online]. Available: <http://biologiedelapeau.fr/spip.php?article30>. [Accessed: 30-Nov-2016].
- [51] V. E. Abraira and D. D. Ginty, "The Sensory Neurons of Touch," *Neuron*, vol. 79, no. 4, 2013.
- [52] I. Birznieks, V. G. Macefield, G. Westling, and R. S. Johansson, "Slowly adapting mechanoreceptors in the borders of the human fingernail encode fingertip forces.," *J. Neurosci.*, vol. 29, no. 29, pp. 9370–9, Jul. 2009.
- [53] E. Amaied, R. Vargiolu, J. M. Bergheau, and H. Zahouani, "Aging effect on tactile perception: Experimental and modelling studies," *Wear*, vol. 332–333, pp. 715–724, May 2015.
- [54] S. Maricich, S. Wellnitz, A. Nelson, E. Lumpkin, and H. Zoghbu, "Merkel cells are essential for light-touch responses.," *Science2009*, vol. 5934, no. 1580–1582, 324AD.
- [55] C. Idé, "The fine structure of the digital corpuscle of the mouse toe pad, with special reference to nerve fibers.," *Am J Anat*, vol. 147, no. 3, pp. 329–355, 1976.
- [56] N. Cauna, "Nerve supply and nerve endings in Meissner's corpuscles," *I Am J Anat*, vol. 99, no. 2, pp. 315–350, 956.
- [57] N. Cauna and L. Ross, "The fine structure of Meissner's touch corpuscles of human fingers," *J Biophys Biochem Cytol*, vol. 8, pp. 467–482, 1960.
- [58] A. Zimmerman, L. Bai, D. D. Ginty, and L. Avenue, "The gentle touch receptors of mammalian skin," *Science (80-.)*, vol. 346, no. 6212, pp. 950–954, 2014.
- [59] N. Cauna and G. Mannan, "The structure of human digital pacinian corpuscles (corpus cula lamellosa) and its functional significance.," *J Anat*, vol. 92, no. 1, pp. 1–20, 1958.
- [60] R. Schepers and M. Ringkamp, "Thermoreceptors and thermosensitive afferents.," *Neurosci Biobehav Rev*, vol. 33, no. 3, pp. 205–212, 2009.

- [61] F. a Pinho-Ribeiro, W. a Verri, and I. M. Chiu, “Nociceptor Sensory Neuron-Immune Interactions in Pain and Inflammation.,” *Trends Immunol.*, vol. xx, pp. 1–15, Oct. 2016.
- [62] D. Le Bars and F. Adam, “Nocicepteurs et médiateurs dans la douleur aiguë inflammatoire,” *Ann. Fr. Anesth. Reanim.*, vol. 21, no. 4, pp. 315–335, Apr. 2002.
- [63] R. Passas, “Caractérisation de la morphologie des fibres de bois,” 2008. [Online]. Available: <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/tutoriel/morphologie-fibres-bois/page03.htm>. [Accessed: 01-Dec-2016].
- [64] E. Tourette, “Etude mécanique et physico-chimique du contact rouleau - papier lors du calandrage,” Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007.
- [65] “De la pâte à la feuille,” *Papier*, 1999. [Online]. Available: cerig.efpg.inpg.fr.
- [66] J. Theberge, “Analyse du procédé de crêpage du papier et suivi de l’usure des lames de crêpage par émission acoustique,” Université de Sherbrooke, 2008.
- [67] Kyle SoloRio, “How charmin toilet paper cleaned up the german market,” *Market Research*. [Online]. Available: <http://blog.marketresearch.com/blog-home-page/bid/183787/How-Charmin-Toilet-Paper-Cleaned-up-the-German-Market>. [Accessed: 07-Dec-2016].
- [68] T. european tissue paper Association, “Faits et données des marchés du papier à usage unique,” *euopeantissuesymposium*, 2016. [Online]. Available: <http://europeantissue.com/abouthttp://europeantissue.com>. [Accessed: 07-Dec-2016].
- [69] J. J. Gibson, *The senses considered as perceptual systems*, Houghton M. Boston, 1966.
- [70] S. J. Bolanowski, R. T. Verrillo, and F. McGlone, “Passive, active and intra-active (self) touch,” *Behav. Brain Res.*, vol. 148, no. 1–2, pp. 41–45, Jan. 2004.
- [71] G. Revesz, *Die Formenwelt des Tastsinnes: Bd. Grundlegung der Haptik und der Blindenpsychologie*, Longmans G. New-York, 1950.
- [72] S. J. Lederman and R. L. Klatzky, “Hand movements: A window into haptic object recognition,” *Cogn. Psychol.*, vol. 19, no. 3, pp. 342–368, Jul. 1987.
- [73] K. O. Johnson and G. D. Lamb, “Neural mechanisms of spatial tactile discrimination: Neural patterns evoked by Braille-like dot patterns in the monkey.,” *J. Physiol.*, vol. 310, pp. 117–144, 1981.
- [74] S. Bensmaïa and M. Hollins, “The vibrations of texture,” *Somatosens. Mot. Res.*, vol. 20, no. 1, pp. 33–43, 2003.
- [75] D. Blake, S. Hsiao, and K. O. Johnson, “Neural coding mechanisms in tactile pattern recognition: the relative contributions of slowly and rapidly adapting mechanoreceptors to perceived roughness,” *J. Neurosci.*, vol. 17, no. 19, pp. 7480–7489, 1997.

- [76] T. Yoshioka, J. Craig, G. Beck, and S. Hsiao, “Perceptual constancy of texture roughness in the tactile system,” *J. Neurosci.*, vol. 31, no. 48, pp. 17603–17611, 2011.
- [77] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers, “Analysis of haptic perception of materials by multidimensional scaling and physical measurements of roughness and compressibility,” *Acta Psychol. (Amst.)*, vol. 121, no. 1, pp. 1–20, Jan. 2006.
- [78] J. Fishel and G. Loeb, “Bayesian exploration for intelligent identification of textures,” *Front Neurobot*, vol. 6, no. 4, 2012.
- [79] S. Bolanowski, G. Gesheider, R. Verrillo, and C. Checkosky, “Four channels mediate the mechanical aspects of touch,” *J Acoust Soc Am*, vol. 84, pp. 1680–1694, 1988.
- [80] M. Hollins, R. Faldowski, S. Rao, and F. Young, “Perceptual dimensions of tactile surface texture: A multidimensional scaling analysis,” *Percept. Psychophys.*, vol. 54, no. 6, pp. 697–705, 1993.
- [81] P.-H. Cornuault, L. Carpentier, M.-A. Bueno, J.-M. Cote, and G. Monteil, “Influence of physico-chemical, mechanical and morphological fingerpad properties on the frictional distinction of sticky/slippery surfaces,” *J. R. Soc. Interface*, vol. 12, no. 110, 2015.
- [82] Y. Nonomura, Y. Arashi, and T. Maeno, “How do we recognize water and oil through our tactile sense?,” *Colloids Surf. B. Biointerfaces*, vol. 73, no. 1, pp. 80–3, Oct. 2009.
- [83] Z. Fazekas, J. Kömüves, and I. Renyi, “Towards objective visual assessment of fabric features,” *IEEE Conf. Publ. Inst. Electr. Eng.*, pp. 411–416, 1999.
- [84] J. Cardamone, W. Damert, and J. Phillips, “Digital image analysis for fabric assessment,” *Text Res J*, vol. 72, pp. 906–916, 2002.
- [85] H. Strese, M. Kuck, and R. Benken, “Application of optical methods to characterize textile materials and their influence on the human skin,” *J Biomed Opt*, vol. 16, pp. 3–5, 2011.
- [86] S. Kawabata and M. Niwa, “Objective measurement of fabric hand,” in *Modern textiles characterization methods*, Inc, Marce., New-York, 1996, pp. 329–354.
- [87] L. Bacci, F. Camilli, S. Drago, M. Magli, E. Vagnoni, a. Mauro, and S. Predieri, “Sensory evaluation and instrumental measurements to determine tactile properties of wool fabrics,” *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 14, pp. 1430–1441, Mar. 2012.
- [88] P. Kenins, “Influence of fiber type and moisture on measured fabric-to-skin friction,” *Text. Res. J.*, vol. 64, no. 12, pp. 722–728, 1994.
- [89] E. Bertaux and M. Lewandowski, “Relationship between Friction and Tactile Properties for Woven and Knitted Fabrics,” *Text. Res. J.*, vol. 77, no. 6, pp. 387–396, 2007.
- [90] A. Ramalho, P. Szekeres, and E. Fernandes, “Friction and tactile perception of textile fabrics,” *Tribol. Int.*, vol. 63, pp. 29–33, Jul. 2013.

- [91] S. Sokhanvar, M. Packirisamy, and J. Dargahi, "A multifunctional PVDF-based tactile sensor for minimally invasive surgery," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 4, pp. 989–998, Aug. 2007.
- [92] R. Kikuuwe, K. Nakamura, and M. Yamamoto, "Finger-Mounted Tactile Sensor for Evaluating Surfaces," *J Robot Mechatron*, vol. 24, no. 3, pp. 143–440, 2012.
- [93] S. Chen, G. Shirong, W. Tang, and N. Chen, "Tactile perception of fabrics with an artificial finger compared to human sensing," *Text. Res. journal*⁹, vol. 85, no. 20, 2015.
- [94] I. M. Koc and C. Aksu, "Tactile sensing of constructional differences in fabrics with a polymeric finger tip," *Tribol. Int.*, vol. 59, pp. 339–349, 2013.
- [95] R. Fagiani, F. Massi, E. Chatelet, Y. Berthier, and A. Akay, "Tactile perception by friction induced vibrations," *Tribol. Int.*, vol. 44, no. 10, pp. 1100–1110, Sep. 2011.
- [96] H. Hollmark, "Evaluation of Tissue Paper Softness," *Tappi J*, vol. 62, no. 4, pp. 695–705, 1983.
- [97] Y. Pan, C. Habeger, and J. Biasca, "EMPIRICAL RELATIONSHIPS BETWEEN TISSUE SOFTNESS AND OUT-OF-PLANE ULTRASONIC MEASUREMENTS," *ICP Tech. Pap. Ser.*, no. 322, 1989.
- [98] J. Rust, T. Shalev, T. Keadle, and R. Barker, "Evaluation of Surface Softness of Tissue Paper Products Using Mechanical Stylus Scanning, Optical Image Analysis and Fuzzy Sets," in *Nonwoven Conference Proceedings*, 1994.
- [99] H. Hollmark and R. S. Ampulski, "Measurement of tissue paper softness: A literature review," *Nord. Pulp Pap. Res.*, vol. 19, no. 3, pp. 345–353, 2004.
- [100] H. Zahouani, S. Mezghani, R. Vargiolu, T. Hoc, and M. EL Mansori, "Effect of roughness on vibration of human finger during a friction test," *Wear*, vol. 301, no. 1–2, pp. 343–352, Apr. 2013.
- [101] J. R. Phillips, O. Ox, and U. Kingdom, "Responses of Human Mechanoreceptive Arrays Scanned across Fingerpad Skin Afferents to Embossed Dot," *J. Neurosci.*, vol. 12, no. 3, pp. 827–839, 1992.
- [102] M. Bueno, F. Massi, B. Camillieri, and Y. Berthier, "FRICTION AND VIBRATION CRITERIA FOR TACTILE DISCRIMINATION OF PILE FABRICS," in *Proceedings of the 42th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, 2015, vol. 11, no. 4.
- [103] S. Mezghani, "Approches multi-échelles de caractérisation tridimensionnelle des surfaces –," Ecole Centrale de Lyon, 2005.
- [104] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Burlington: Elsevier, 1999.
- [105] H. Zahouani, R. Vargiolu, G. Boyer, C. Pailler-Mattei, L. Laquière, and a. Mavon, "Friction noise of human skin in vivo," *Wear*, vol. 267, no. 5–8, pp. 1274–1280, Jun. 2009.

- [106] Y. Nonomura, T. Fujii, Y. Arashi, T. Miura, T. Maeno, K. Tashiro, Y. Kamikawa, and R. Monchi, "Tactile impression and friction of water on human skin," *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 69, no. 2, pp. 264–267, 2009.
- [107] M. J. Adams, B. J. Briscoe, and S. a. Johnson, "Friction and lubrication of human skin," *Tribol. Lett.*, vol. 26, no. 3, pp. 239–253, Mar. 2007.
- [108] L. J. Wolfram, "Friction of skin," *J. Soc. Cosmet. Chem.*, vol. 34, pp. 465–476, 1983.
- [109] C. Laverdet and L. Martin, "Allergies et irritations cutanées du jeune enfant," *Cah. la puéricultrice*, no. 5, pp. 220–225, 2008.
- [110] J. M. Crowther, a Sieg, P. Blenkiron, C. Marcott, P. J. Matts, J. R. Kaczvinsky, and a V Rawlings, "Measuring the effects of topical moisturizers on changes in stratum corneum thickness, water gradients and hydration in vivo.," *Br. J. Dermatol.*, vol. 159, no. 3, pp. 567–77, Sep. 2008.
- [111] M. a Farage, A. Ebrahimpour, B. Steimle, J. Englehart, and D. Smith, "Evaluation of lotion formulations on irritation using the modified forearm-controlled application test method.," *Ski. Res. Technol.*, vol. 13, pp. 268–279, Aug. 2007.
- [112] M. Farage, *Non invasive diagnostic techniques in clinical dermatology*. Heidelberg: Springer, 2014.
- [113] T. S. C. Poon, J. M. Kuchel, A. Badruddin, and M. Hatao, "Objective Measurement of Minimal Erythema and Melanogenic Doses Using Natural and Solar-simulated Light," *Photochem. Photobiol.*, vol. 78, no. 4, pp. 331–336, 2003.
- [114] N. S. Trookman, R. L. Rizer, and T. Weber, "Irritation and allergy patch test analysis of topical treatments commonly used in wound care: evaluation on normal and compromised skin.," *J. Am. Acad. Dermatol.*, vol. 64, no. 3 Suppl, pp. S16–22, Mar. 2011.
- [115] E. Alanen, J. Nuutinen, K. Nicklen, T. Lahtinen, and J. Monkkonen, "Measurement of hydration in the stratum corneum with the MoistureMeter and comparison with the Corneometer," *Ski Res Technol*, vol. 10, no. 1, pp. 32–37, 2004.
- [116] J. W. Fluhrl, M. Gloorl, S. Lazzerini, P. Kleesz, R. Grieshaber, and E. Berardesca, "Comparative study of five instruments measuring stratum corneum hydration (Corneometer CM 820 and CM 825, Skicon 200, Nova DPM 9003, DermaLab). Part II. In vivo," *Ski. Res. Technol.*, vol. 5, pp. 171–178, 1999.
- [117] P. Clarys, R. Clijsen, J. Taeymans, and A. Barel, "Hydration measurements of the stratum corneum: comparison between the capacitance method (digital version of the Corneometer CM 825®) and the impedance method (Skicon-200EX®)," *Ski. Res. Technol.*, vol. 18, pp. 316–323, 2012.
- [118] T. Rosendal, "Concluding Studies on the Conducting Properties of Human Skin to Alternating Current," *Acta Physiol. Scand.*, vol. 9, pp. 39–49, 1945.

- [119] E. Berardesca, P. Elsner, K. Wilhem, and H. Maibach, Eds., *Bioengineering of the skin: Methods and instrumentation, Volume III*. CRC Press, 1995.
- [120] M. Swiontkowski, S. Tepic, R. Ganz, and S. Perren, "Laser Doppler flowmetry for measurement of femoral head blood flow; experimental investigation and clinical application," *Helv. Chir. Acta*, vol. 53, pp. 55–59, 1986.
- [121] N. Almond, "Laser Doppler flowmetry: theory and practice," in *Laser Doppler*, Med-Orion., G. Belcaro, U. Hoffman, A. Bollinger, and A. Nicolaidis, Eds. London, 1994, pp. 17–32.
- [122] A. Fullerton, C. Avnstorp, T. Agner, J. Dahl, L. Olsen, and J. Serup, "Patch test study with calcipotriol ointment in different patient groups, including psoriatic patients with and without adverse dermatitis," *Acta Derm. Venereol.*, vol. 76, pp. 194–202, 1996.
- [123] A. Andriessen, R. Polignano, and M. Abel, "Monitoring the microcirculation to evaluate dressing performance in patients with venous leg ulcers," *J. Wound Care*, vol. 18, pp. 145–150, 2009.
- [124] B. Bjarnason and T. Fisher, "Objective assessment of nickel sulfate patch test reactions with laser Doppler perfusion imaging," *Contact dermatitis*, vol. 39, pp. 112–118, 1998.
- [125] T. Fisher, A. Dahlen, and B. Bjarnason, "Influence of patch-test application tape on reactions to sodium dodecyl sulfate," *Contact Dermatitis*, vol. 40, pp. 32–37, 1999.
- [126] A. Goon, Y. Leow, Y. Chan, and C. Goh, "Correlation between laser Doppler perfusion imaging and visual scoring of patch test sites in subjects with experimentally induced allergic and irritant contact reactions," *Ski. Res. Technol.*, vol. 10, pp. 64–66, 2004.
- [127] T. Maiman, "in vivo evaluation of microcirculation by coherent light scattering," *Nature*, vol. 254, pp. 56–58, 1975.
- [128] T. Tenland, E. Salerud, G. Nilsson, and P. Oberg, "Spatial and temporal variations in human skin blood flow," *Int. J. Microcirc. Clin. Exp.*, vol. 2, pp. 81–90, 1983.
- [129] G. Nilsson, T. Tenland, and P. Oberg, "Evaluation of a laser Doppler flowmeter for measurement of tissue blood flow," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 27, pp. 597–604, 1980.
- [130] A. Bircher, E. de Boer, T. Agner, J. Wahlberg, and J. Serup, "Guidelines for measurement of cutaneous blood flow by laser Doppler flowmetry. a report from the standardization group of the european society of contact dermatitis," *Contact Dermatitis*, vol. 30, pp. 65–72, 1994.
- [131] A. Rawlings, P. Matts, C. Anderson, and M. Roberts, "Skin biology, xerosis, Barrier Measurement, repair and measurement," *Drug Discov. Today Dis. Mech.*, vol. 5, pp. 127–136, 2008.

- [132] E. Simpson, A. Böhling, S. Bielfeldt, C. Bosc, and N. Kerrouche, “Improvement of skin barrier function in atopic dermatitis patients with a new moisturizer containing a ceramide precursor,” *J Dermatol Treat*, vol. 24, no. 2, pp. 122–125, 2013.
- [133] T. Chou, K. Lin, S. Wang, C. Lee, S. SU, T. Shih, and H. Chang, “Transepidermal water loss and skin capacitance alterations among workers in an ultra-low humidity environment,” *Arch Dermatol Res*, vol. 296, no. 10, pp. 189–195, 2005.
- [134] C. Rosado, P. Pinto, and L. M. Rodrigues, “Comparative assessment of the performance of two generations of Tewameter \hat{a} : TM210 and TM300,” *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 27, pp. 237–241, 2005.
- [135] D. Hildebrandt, K. Ziegler, and U. Wollina, “Electrical impedance and transepidermal water loss of healthy human skin under different conditions,” *Ski. Res. Technol.*, vol. 4, pp. 130–134, 998.
- [136] L. Rodrigues, “EEMCO guidance to the in vivo assessment of tensile functional properties of the skin. Part 2: instrumentation and test modes,” *Ski. Pharmacol Appl Ski. Physiol*, vol. 14, no. 1, pp. 52–67, 2001.
- [137] D. N. Tasron, T. J. Thurston, and M. J. Carré, “Frictional Behaviour of Running Sock Textiles Against Plantar Skin,” *Procedia Eng.*, vol. 112, pp. 110–115, 2015.
- [138] C.-Y. Chen, C.-A. Yu, T.-F. Hong, Y.-L. Chung, and W.-L. Li, “Contact and frictional properties of stratum corneum of human skin,” *Biosurface and Biotribology*, vol. 1, no. 1, pp. 62–70, Mar. 2015.
- [139] M. Djaghloul, “Bio-ingénierie de la palpation mécanique cutanée par instrumentation non invasive: compréhension du vieillissement chronologique,” Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2014.
- [140] C. Li, G. Guan, R. Reif, Z. Huang, and R. K. Wang, “Determining elastic properties of skin by measuring surface waves from an impulse mechanical stimulus using phase-sensitive optical coherence tomography,” no. November 2011, pp. 831–841, 2012.
- [141] X. Lian and S. A. Boppart, “Biomechanical Properties of In Vivo Human Skin From Dynamic Optical Coherence Elastography,” *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 57, no. 4, pp. 953–959, 2010.
- [142] S. Shuster, M. Black, and E. McVitie, “The influence of age and sex on skin thickness, skin collagen and density,” *Br J Dermatol*, vol. 93, no. 6, pp. 639–643, 1975.
- [143] G. Boyer, C. Pailler Mattei, J. Molimard, M. Pericoi, S. Laquieze, and H. Zahouani, “Non contact method for in vivo assessment of skin mechanical properties for assessing effect of ageing,” *Med. Eng. Phys.*, vol. 34, no. 2, pp. 172–8, Mar. 2012.
- [144] S. Boisnic and M. Branchet, “Vieillessement cutané chronologique,” *EMC-Dermatologie Cosmétologie*, vol. 2, pp. 232–241, 2005.

- [145] F. J. G. Ebling, "Physiological background to skin ageing.," *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 103–110, 1982.
- [146] J. Waller and H. Maibach, "Age and skin structure and function, a quantitative approach (ii): Protein, glycosaminoglycan, water, and lipid content and structure," *Ski. Res. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 145–154, 2006.
- [147] C. Escoffier, J. de Rigal, A. Rochefort, R. Vasselet, J. Lévêque, and P. Agache, "Age-Related mechanical properties of human skin : An in vivo study," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 93, no. 3, pp. 353–357, 1989.
- [148] L.-C. Gerhardt, a Lenz, N. D. Spencer, T. Münzer, and S. Derler, "Skin-textile friction and skin elasticity in young and aged persons.," *Skin Res. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 288–98, Aug. 2009.
- [149] P. Elsner, D. Wilhelm, and H. I. Maibach, "Mechanical properties of human forearm and vulvar skin," *Br. J. Dermatol.*, vol. 122, no. 5, pp. 607–614, May 1990.
- [150] C.-Y. Chen, C.-A. Yu, T.-F. Hong, Y.-L. Chung, and W.-L. Li, "Contact and frictional properties of stratum corneum of human skin," *Biosurface and Biotribology*, vol. 1, no. 1, pp. 62–70, Mar. 2015.
- [151] C. S. King, S. P. Barton, S. Nicholls, and R. Marks, "The change in properties of the stratum corneum as a function of depth," *Br. J. Dermatol.*, vol. 100, no. 2, pp. 165–172, Feb. 1979.
- [152] D. Mohammed, Q. Yang, R. H. Guy, P. J. Matts, J. Hadgraft, and M. E. Lane, "Comparison of gravimetric and spectroscopic approaches to quantify stratum corneum removed by tape-stripping.," *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, vol. 82, no. 1, pp. 171–4, Sep. 2012.
- [153] C. Paillet-Mattei, "Caractérisations mécanique et mécanique de la peau in vivo," Ecole Centrale de Lyon, 2004.
- [154] A. A. Koudine, M. Barquins, P. H. Anthoine, L. Aubert, and J. L. Lévêque, "Frictional properties of skin: proposal of a new approach.," *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 22, no. 1, pp. 11–20, Mar. 2000.
- [155] F. P. Bowden and D. Tabor, *The friction and lubrication of solids*. New-York, 1954.
- [156] J. Greenwood and D. Tabor, "The Friction of Hard Sliders on Lubricated Rubber: The Importance of Deformation Losses," *Proc. Phys. Soc.*, vol. 71, no. 6, p. 989, 1958.
- [157] D. Mazuyer, "La force de frottement limite," Ecole Centrale de Lyon, 1989.
- [158] M. J. Adams, B. J. Briscoe, and S. A. Johnson, "Friction and lubrication of human skin," *Tribol. Lett.*, vol. 26, no. 3, pp. 239–253, 2007.

- [159] S. Derler, U. Schrade, and L.-C. Gerhardt, "Tribology of human skin and mechanical skin equivalents in contact with textiles," *Wear*, vol. 263, no. 7–12, pp. 1112–1116, Sep. 2007.
- [160] S. Lafaye, "Propriétés mécaniques de friction et déformation des surfaces de polymères solides," Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2002.
- [161] R. Sivamani, N. Wu, GCGitis, and H. Maibach, "Tribological testing of skin products: gender, age, and ethnicity on the volar forearm," *Ski. Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 299–305, 2003.
- [162] H. Tanimoto and M. Nashimoto, "Evaluation of cosmetic effects with a friction meter," *Cosmet. Toilet.*, vol. 94, pp. 20–24, 1979.
- [163] W. Tang, B. Bhushan, and S. Ge, "Friction, adhesion and durability and influence of humidity on adhesion and surface charging of skin and various skin creams using atomic force microscopy," *J. Microsc.*, vol. 239, pp. 99–116, 2010.
- [164] A. Elkhyat, S. Mac-Mary, and P. Humbert, "Skin wettability and friction," in *Handbook of Cosmetic Science and Technology*, A. Barel, M. Paye, and H. Maibach, Eds. New-York, 2009, pp. 427–436.
- [165] M. Loden, H. Olsson, T. Axell, and Y. W. Linde, "Friction, capacitance and transepidermal water loss (TEWL) in dry atopic and normal skin," *Br. J. Dermatol.*, vol. 126, no. 2, pp. 137–141, Feb. 1992.
- [166] M. O. Visscher, D. Ph, R. Chatterjee, D. Ph, J. P. Ebel, D. Ph, A. A. Laruffa, and S. B. Hoath, "Biomedical Assessment and Instrumental Evaluation of Healthy Infant Skin," *Pediatr Dermatol*, vol. 19, no. 6, pp. 473–481, 2002.
- [167] C. W. A. Akers and U. S. A. Retired, "Measurements of Friction Injuries in Man," *Am. J. Ind. Med.*, vol. 481, pp. 473–481, 1985.
- [168] W. Li, M. Kong, X. D. Liu, and Z. R. Zhou, "Tribological behavior of scar skin and prosthetic skin in vivo," *Tribol. Int.*, vol. 41, no. 7, pp. 640–647, Jul. 2008.
- [169] J. E. Sanders, J. M. Greve, S. B. Mitchell, and S. G. Zachariah, "their static coefficients of friction with skin and socks," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 35, no. 2, pp. 161–176, 1998.
- [170] M. Darden and C. J. Schwartz, "Investigation of skin tribology and its effects on the tactile attributes of polymer fabrics," *Wear*, vol. 267, no. 5–8, pp. 1289–1294, 2009.
- [171] A. Cottenden, W. Wong, D. Cottenden, and A. Farbrot, "Development and validation of a new method for measuring friction between skin and nonwoven materials," *Proc. Inst. Mech. Eng. H.*, vol. 222, no. 5, pp. 791–803, 2008.
- [172] E. Baussan, "Etude tribologique et modélisation du contact peau - chaussette. Application à la course à pied.," Université de Haute Alsace, 2010.

- [173] P. Naylor, "The skin surface and friction," *Br. J. Dermatology*, vol. 67, no. 239–246, 1955.
- [174] A. El-Shimi, "In vivo skin friction measurements," *J Soc Cosmet Chem*, vol. 28, pp. 37–51, 1977.
- [175] R. K. Sivamani, J. Goodman, N. V. Gitis, and H. I. Maibach, "Friction coefficient of skin in real-time," *Ski. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 235–239, Aug. 2003.
- [176] A. Cottenden, W. Wong, D. Cottenden, and A. Farbrot, "Development and validation of a new method for measuring friction between skin and nonwoven materials," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, vol. 222, no. 5, pp. 791–803, 2008.
- [177] M. Zhang and A. Mak, "In vivo friction properties of human skin," *Ski. Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 23, no. 2, pp. 135–141, 1999.
- [178] W. Tang, S. Ge, H. Zhu, X. Cao, and N. Li, "The Influence of Normal Load and Sliding Speed on Frictional Properties of Skin," *J. Bionic Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 33–38, Mar. 2008.
- [179] B. J. Johnson, S.A., Gorman, D.M., Adams, M.J., Briscoe, "The friction and lubrication of human stratum corneum," in *Proceedings of the 19th Leeds-Lyon Symposium on Tribology held at the Institute of Tribology*, 1993, pp. 663–672.
- [180] S. Derler and L.-C. Gerhardt, "Tribology of Skin: Review and Analysis of Experimental Results for the Friction Coefficient of Human Skin," *Tribol. Lett.*, vol. 45, no. 1, pp. 1–27, Oct. 2011.
- [181] S. C. O. M. Ish and E. V. A. Bottoms, "THE SKIN Km) FRICTION: DEVIATIONS FROM AMONTON'S LAWS, AND THE EFFECTS OF HYDRATION AND LUBRICATION," vol. 6, no. 1071, 1970.
- [182] R. K. Sivamani and H. I. Maibach, "Tribology of skin," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 220, no. 8, pp. 729–737, Aug. 2006.
- [183] Y. H. Zhu, S. P. Song, W. Luo, P. M. Elias, and M. Q. Man, "Characterization of skin friction coefficient, and relationship to stratum corneum hydration in a normal Chinese population," *Ski. Pharmacol Physiol.*, vol. 24, no. 2, pp. 81–86, 2011.
- [184] L.-C. Gerhardt, V. Strässle, a Lenz, N. D. Spencer, and S. Derler, "Influence of epidermal hydration on the friction of human skin against textiles.," *J. R. Soc. Interface*, vol. 5, no. 28, pp. 1317–28, Nov. 2008.
- [185] M. Kwiatkowska, S. E. Franklin, C. P. Hendriks, and K. Kwiatkowski, "Friction and deformation behaviour of human skin," *Wear*, vol. 267, no. 5–8, pp. 1264–1273, Jun. 2009.
- [186] C. P. Hendriks and S. E. Franklin, "Influence of Surface Roughness, Material and Climate Conditions on the Friction of Human Skin," *Tribol. Lett.*, vol. 37, no. 2, pp. 361–373, Oct. 2009.

- [187] A. B. Cua, K. Wilhelm, and H. Maibach, "Frictional properties of human skin: relation to age, sex and anatomical region, stratum corneum hydration and transepidermal water loss," *Br. J. Dermatol.*, vol. 123, no. 4, pp. 473–479, 1990.
- [188] A. R. Gwosdow, J. C. Stevens, L. G. Berglund, J. B. P. Foundation, and J. A. J. Stolwijk, "Skin Friction and Fabric Sensations in Neutral and Warm Environments," *Text Res J*, vol. 56, pp. 574–580, 1986.
- [189] P. Elsner, K. Wilhelm, and H. Maibach, "Frictional properties of human forearm and vulvar skin: influence of age and correlation with transepidermal water loss and capacitance," *Dermatologica*, vol. 181, no. 2, pp. 88–91, 1990.
- [190] A. B. Cua, K. Wilhelm, and H. Maibach, "Skin surface lipid and skin friction: relation to age, sex and anatomical region.," *Ski. Pharmacol.*, vol. 8, no. 5, pp. 246–251, 1995.
- [191] C. P. Hendriks and S. E. Franklin, "Influence of Surface Roughness, Material and Climate Conditions on the Friction of Human Skin," *Tribol. Lett.*, vol. 37, no. 2, pp. 361–373, Oct. 2009.
- [192] J. Asserin, H. Zahouani, and P. Humbert, "Measurement of the friction coefficient of the human skin in vivo: quantification of the cutaneous smoothness," *Colloids surfaces B ...*, vol. 19, pp. 1–12, 2000.
- [193] J. Pan, N., He, J.-H., Yu, "Fibrous material as soft matter," *Text. Res. J.*, vol. 77, no. 4, pp. 205–213, 2007.
- [194] N. D. Gerhardt, L.-C., Mattle, N., Schrade, G.U., Spencer and S. Derler, "Study of skin-fabric interactions of relevance to decubitus: friction and contact-pressure measurements," *Ski. Res. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 77–88, 2008.
- [195] L. Gerhardt, "Tribology of human skin in contact with medical textiles for decubitus prevention," ETH Zurich, 2008.
- [196] S. Gerhardt, L.-C., Lenz, A., Spencer, N.D., Muñzer, T., Derler, "Skin-textile friction and skin elasticity in young and aged persons," *Ski. Res. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 288–298, 2009.
- [197] E. Comaish, S., Bottoms, "The skin and friction: deviations from Amonton's laws, and the effects of hydration and lubrication," *Br. J. Dermatol.*, vol. 84, no. 1, pp. 37–43, 1971.
- [198] W. Morton and J. Hearle, "Physical Properties of Textile Fibres," *Woodhead Publ. Text. CRC Press. Boca Rat.*, vol. 4, 2008.
- [199] W. Zhong, M. M. Q. Xing, N. Pan, and H. I. Maibach, "Textiles and human skin, microclimate, cutaneous reactions: an overview.," *Cutan. Ocul. Toxicol.*, vol. 25, no. 1, pp. 23–39, Jan. 2006.

- [200] S. Derler, L.-C. Gerhardt, a. Lenz, E. Bertaux, and M. Hadad, “Friction of human skin against smooth and rough glass as a function of the contact pressure,” *Tribol. Int.*, vol. 42, no. 11–12, pp. 1565–1574, Dec. 2009.
- [201] R. K. Sivamani, J. Goodman, N. V Gitis, and H. I. Maibach, “Review Coefficient of friction: tribological studies in man ± an overview,” *Ski. Res. Technol.*, vol. 9, pp. 227–234, 2003.
- [202] M. Djaghloul, F. Morizot, and H. Zahouani, “Elastic wave induced by friction as a signature of human skin ageing and gender effect,” *Ski. Res. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 349–355, 2015.
- [203] A. Zucconi, “An introduction to signal smoothing,” 2016. [Online]. Available: <http://www.alanzucconi.com/2016/06/03/an-introduction-to-signal-smoothing/>.
- [204] U. Æ. Heinrich, U. Koop, M. Leneveu-duchemin, K. Osterrieder, S. Bielfeldt, and C. Chkarnat, “Multicentre comparison of skin hydration in terms parameters by the capacitive method (Corneometer CM 825),” *Int. J. Cosmet. Sci.*, vol. 25, pp. 45–53, 2003.
- [205] S. Kondo, “The frictional properties between fabrics and the human skin. Part 2: influences of stratum corneum water content, hardness of skin, friction pressure and friction speed on the frictional properties,” *J. Japan Res. Assoc. Text. End-Uses*, vol. 43, pp. 305–321, 2002.
- [206] M. Egawa, M., Oguri, M., Hirao, T., Takahashi and M. Miyakawa, “The evaluation of skin friction using a frictional feel analyzer,” *Ski. Res. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 41–51, 2002.
- [207] S. Ding and B. Bhushan, “Tactile perception of skin and skin cream by friction induced vibrations.,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 481, pp. 131–43, Nov. 2016.
- [208] P. Kenins, “Influence of fiber type and moisture on measured fabric-to-skin friction,” *Text Res J*, vol. 64, no. 12, pp. 722–728, 1994.
- [209] M. Egawa, M. Oguri, M. Hirao, M. Takahashi, and M. Miyakawa, “The evaluation of skin friction using a frictional feel analyzer,” *Ski. Res. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 41–51, 2002.
- [210] Y. H. Zhu, S. P. Song, W. Luo, P. M. Elias, and M. Q. Man, “Characterization of skin friction coefficient, and relationship to stratum corneum hydration in a normal Chinese population.,” *Skin Pharmacol. Physiol.*, vol. 24, no. 2, pp. 81–6, Jan. 2011.
- [211] D. Cottenden, “A multiscale analysis of frictional interaction between human skin and nonwoven fabrics,” University College London, 2010.
- [212] M. Djaghloul, F. Morizot, and H. Zahouani, “Elastic wave induced by friction as a signature of human skin ageing and gender effect,” *Ski. Res. Technol.*, p. n/a–n/a, 2015.

- [213] H. Zahouani, G. Boyer, C. Pailler-Mattei, M. Ben Tkaya, and R. Vargiolu, "Effect of human ageing on skin rheology and tribology," *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 2364–2369, Jul. 2011.
- [214] C. Pailler-Mattei, R. Debret, R. Vargiolu, P. Sommer, and H. Zahouani, "In vivo skin biophysical behaviour and surface topography as a function of ageing.," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 28, pp. 474–83, Dec. 2013.
- [215] D. W. Koenig, B. Dvoracek, and R. Vongska, "In vitro prediction of in vivo skin damage associated with the wiping of dry tissue against skin," *Ski Res Technol*, vol. 19, pp. 453–458, 2013.
- [216] H. . M. J Singh, M Gross, B Sage, H.T Davis, "Effect of saline iontophoresis on skin barrier function and cutaneous irritation in four ethnic groups," *Food Chem. Toxicol.*, vol. 38, no. 8, pp. 717–726, 2000.
- [217] Y. H. Zhu, S. P. Song, W. Luo, and M. Q. Man, "Characterization of Skin Friction Coefficient, and Relationship to Stratum Corneum Hydration in Normal Chinese Population," *Skin Pharmacol. Physiol.*, vol. 24, no. 2, pp. 81–86, 2010.
- [218] R. Sivamani, G. Wu, N. Gitis, and H. Maibach, "Tribological testing of skin products: gender, age, and ethnicity on the volar forearm.," *Ski. Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 299–305, 2003.
- [219] E. H. . Nacht, S., Close, J.-A., Yeung, D., Gans, "Skin friction coefficient: changes induced by skin hydration and emollient application and correlation with perceived skin feel," *J. Soc. Cosmet. Chem.*, vol. 32, no. 2, pp. 55–65, 1981.
- [220] C. Pailler-Mattei, S. Nicoli, F. Pirot, R. Vargiolu, and H. Zahouani, "A new approach to describe the skin surface physical properties in vivo.," *Colloids Surf. B. Biointerfaces*, vol. 68, no. 2, pp. 200–6, Feb. 2009.
- [221] L. K. Pedersen and G. B. E. Jemec, "Plasticising effect of water and glycerin on human skin in vivo," vol. 19, no. June 1998, pp. 48–52, 1999.

N° d'ordre : 2017LYSEE001

Prénom NOM : Coralie THIEULIN

DISSERTATION TITLE: CHARACTERISATION OF THE DAMAGE OF STRATUM CORNEUM INDUCED BY REPEATED FRICTION BETWEEN THE HUMAN SKIN SURFACE AND CELLULOSE TISSUE PRODUCTS

Speciality: Mechanics and engineering

Keywords: Friction ; irritation ; tactile perception ; mechanical properties ; cellulose papers

Abstract:

Far from being a mere envelope around our bodies, the skin forms a mechanical, physical, chemical and immunological barrier. This protective task falls in large part in the outermost layer, the stratum corneum. However, in our daily lives, the repeated friction of cellulose tissues against the skin surface may induce discomfort feelings and cutaneous reactions. In particular, during colds, the repeated friction of tissues could compromise the skin around the nose and induce painful irritation.

This work is about meeting consumer needs in terms of softness and user comfort of cellulose tissues. To this end, the study was decomposed into two main parts. The first part was devoted to the quantification of the tactile quality of the tissues. The second one was interested in the skin/tissue interaction and the potential irritant effect during the repeated friction.

N° d'ordre : 2017LYSEEE001

Prénom NOM : Coralie THIEULIN

TITRE DE LA THÈSE : CARACTERISATION DES MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DU STRATUM CORNEUM INDUIT PAR LE FROTTEMENT REPETE DE PAPIERS EN CELLULOSE

Spécialité : Mécanique et Ingénierie

Mots clefs : Frottement ; irritation ; perception tactile ; propriétés mécaniques ; papiers en cellulose

Résumé :

Loin d'être une simple enveloppe pour notre corps, la peau constitue une frontière mécanique, physique, chimique et immunologique d'une remarquable efficacité. Cette fonction est en grande partie assurée par la couche la plus superficielle de la peau, appelée stratum corneum. Néanmoins, dans la vie de tous les jours, le frottement répété de la peau contre des surfaces textiles peut engendrer l'apparition de sensations d'inconfort et d'irritation cutanée. En particulier, en période de rhume, les frottements à répétitions des mouchoirs en papier sur le nez fragilisent la peau et peuvent provoquer des irritations parfois douloureuses.

Ce travail vise à répondre aux attentes des consommateurs en termes de confort à l'usage des papiers en cellulose. Pour cela, l'étude a été décomposée en deux grands axes. Actuellement, le confort à l'usage est évalué par des panels sensoriels couteux, chronophages et surtout subjectifs. La première partie a donc été dédiée à l'objectivation des qualités tactiles des papiers en cellulose grâce au développement d'un dispositif expérimental. La seconde s'est intéressée à l'interaction entre la peau et les papiers, et au potentiel effet « irritant » lors du frottement répété. Cette étude a été menée sur un panel de volontaires in vivo et avait pour but de trouver une méthode capable de reproduire le frottement répété de papiers en cellulose en laboratoire, dans un temps limité et avec des paramètres de frottement bien contrôlés.