

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES TECHNOLOGIE SANTE (547)

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Discipline : MÉCANIQUE DES SOLIDES, GÉNIE MÉCANIQUE, PRODUCTIQUE, TRANSPORT ET GÉNIE CIVIL

Spécialité : BIOMÉCANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par

HE THONG BUI

Le 17 janvier 2018

Modélisation et optimisation de l'assise d'un fauteuil roulant pour
handicapés afin d'améliorer le confort du point de vue médical

Thèse dirigée par **KARL DEBRAY**

JURY

M. Gérard LOUIS,	Professeur,	à l'Université Paris Descartes,	Président
M. Karl DEBRAY,	Professeur,	à l'Université de Reims Champagne-Ardenne,	Directeur de thèse
M. Redha TAIAR,	Professeur,	à l'Université de Reims Champagne-Ardenne,	Co-directeur de thèse
Mme Anne-Sophie BONNET,	Maître de Conférences HDR,	à l'Université de Lorraine,	Rapporteur
M. Frédéric MARIN,	Professeur,	à l'Université de Technologie Compiègne,	Rapporteur
M. Yohan PAYAN,	Directeur de Recherche,	à l'Université Grenoble-Alpes,	Examineur
M. Didier PRADON,	Ingénieur - HDR,	à l'Université Paris Saclay,	Examineur
M. Philippe LESTRIEZ,	Maître de conférences,	à l'Université de Reims Champagne-Ardenne,	Examineur
M. Francis CANNARD,		à la Société TEXISENSE,	Invité

À ma femme et mon fils

*Cette thèse est aussi dédiée à toute ma
famille qui a toujours été là pour moi.*

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein du Groupe de Recherche en Sciences de l'Ingénieur (GRESPI) de l'Université de Reims Champagne Ardenne (l'URCA) et au sein du laboratoire d'Analyse du Mouvement à l'Hôpital Universitaires Raymond-Poincaré de Garches. Ces travaux ont été menés sous la direction de M. Karl DEBRAY (professeur à l'URCA), M. Philippe LESTRIEZ (Maître de conférences à l'URCA), M. Redha TAIAR (professeur à l'URCA) du laboratoire GRESPI et M. Didier PRADON (Maître de conférences-HDR) du laboratoire d'Analyse du Mouvement à l'Hôpital Universitaires Raymond-Poincaré de Garches. Je tiens à les remercier de m'avoir accueilli dans leur laboratoire et à l'hôpital universitaires pendant ces 4 dernières années, et de m'avoir guidé et conseillé tout au long de ce travail, et, avant tout de m'avoir fait confiance pour mener à bien ces travaux de recherche. Particulièrement, j'exprime ma sincère reconnaissance au Pr. Karl DEBRAY qui m'a reçu et m'a aidé depuis mes premiers jours à Reims.

Je suis très reconnaissant envers Mme. Anne-Sophie BONNET (MCF.HDR à l'Université de Lorraine) et M. Frédéric MARIN (professeur à l'Université de Technologie Compiègne), pour m'avoir accordé de leur temps afin d'évaluer mes travaux de thèse en tant que rapporteurs.

Je remercie vivement M. Yohan PAYAN, Directeur de recherche CNRS (à l'Université Grenoble-Alpes) et M. Gérard LOUIS, (professeur à l'Université Paris Descartes), qui m'ont fait l'honneur d'accepté de faire partie des membres du jury.

Je tiens à remercier M. Francis CANNARD, M. Éric CHAMPION, M. Olivier CHENU, M. Antoine PERRIER (TEXISENSE) pour ses aides et ses conseils pendant les travaux de ma thèse.

Je tiens également à remercier à la société TEXISENSE, la FONDATION GARCHES, l'équipe THERMOMÉCANIQUE du GRESPI et l'ESIREims (École Supérieure d'Ingénieurs de Reims) qui m'ont prêté les équipements et m'ont soutenu pour effectuer les essais expérimentaux pendant mes travaux de thèse.

Je remercie également le gouvernement du Vietnam de m'avoir accordé la bourse pendant quatre ans pour effectuer ce travail.

Un grand merci à tous mes collègues et amis du laboratoire pour leur accueil et leur aide.

Je remercie également mes amis vietnamiens pour m'avoir encouragé et soutenu dans les moments difficiles.

Cuối cùng, tôi xin cảm ơn vợ yêu của tôi : **Nguyễn Thị Thanh Dung** và con trai tôi : **Bùi Hữu Trực** đã tin tưởng và kiên nhẫn, gia đình tôi (cha tôi, mẹ tôi, gia đình bên vợ tôi ...) và những người thân yêu của tôi, vì sự hỗ trợ vô tận của họ và sự khích lệ trong suốt luận án.

Un grand Merci à tous !

Résumé

Ma thèse a pour objectifs d'étudier et d'améliorer le confort d'un coussin d'assise dans le cas d'un fauteuil roulant pour handicapé, afin de limiter au mieux, l'apparition des escarres.

Mes travaux ont pour principal objectif de modéliser et de simuler numériquement un coussin de type nid-d'abeilles de marque "Stimulite® Honeycomb Cushion" en contact avec un fessier afin de pouvoir (i) modéliser le comportement mécanique de contact, (ii) évaluer la pression ainsi que la distribution des contraintes à l'interface coussin/fessier, et (iii) intégrer les échanges thermiques.

Par ailleurs, des essais expérimentaux ont été effectués pour quantifier les lois de comportement des matériaux constituant le coussin nid d'abeilles. J'ai également utilisé un capteur de cartographie de pression (la nappe de pression TexiMat®) permettant de mesurer la pression à l'interface coussin/fessier.

Parallèlement, une caméra infrarouge a été utilisée pour mesurer la répartition de la température sur le coussin et le fessier pour une personne assise pendant une durée variable.

Mots-clés : coussin, nid d'abeilles, escarre de pression, éléments finis, inconfort, fauteuil roulant, thermographie, infrarouge

Abstract

The aim of this thesis is to study and improve the comfort of a wheelchair cushion for disabilities, to reduce the appearance of pressure ulcers.

In the study, the main objective is to model and simulate numerically a type of cushion, namely “Stimulite® Honeycomb Cushion Classis”, in contact with a buttocks-thigh tissue in order to (i) model the mechanical behavior of contact, (ii) evaluate the pressure and the stress distribution at the interface cushion/buttock-tissue, and (iii) integrate thermo-mechanical exchanges.

Moreover, the experimental tests were carried out to quantify the law of behavior of material constituent of the honeycomb cushion. I also used a pressure-mapping sensor TexiMat® to measure the pressure at the interface cushion/buttocks-thigh tissue.

Meanwhile, an infrared camera was used to measure the temperature distribution on the cushion and buttocks-thigh tissue of a person sitting during variable periods.

Keywords: cushion, honeycomb, pressure ulcers, finite elements, discomfort, wheelchair, thermography, infrared

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	4
Abstract	5
Table des matières.....	6
Table des figures.....	10
Liste des tableaux	15
Liste des annexes	16
Liste des symboles et abréviations	17
Introduction générale.....	19
Chapitre 1	22
Synthèse bibliographique.....	22
Introduction.....	22
1.1 Problématique de l'inconfort d'assise.....	22
1.1.1 Rappels d'anatomie descriptive du complexe bassin-fessier	22
1.1.2 La perception du confort.....	26
1.1.3 Des aides techniques pour la position assise	27
1.1.4 Biomécanique du fessier en compression.....	28
1.2 Développement et prévention des escarres de pression	30
1.2.1 Étiologie des escarres de pression.....	30
1.2.2 Principaux facteurs de développement d'escarres.....	32
1.2.3 Prévention des escarres par les coussins d'assise.....	36
1.3 Rôle des coussins d'assise.....	40
1.4 Types de coussins d'assise et ses matériaux	41
1.5 Modélisation biomécanique du modèle fessier-coussin	43
1.5.1 Les dispositifs expérimentaux.....	43
1.5.2 Les modélisations numériques.....	46
1.5.3 Lois de comportement et propriétés mécaniques	52
1.6 Bilan, objectif et démarche	56

Chapitre 2	57
Modélisation numérique du contact mécanique coussin- fessier.....	57
Introduction.....	57
2.1 Un coussin en nid-d’abeilles : De la réalité à la CAO	58
2.1.1 Introduction	58
2.1.2 Comportement mécanique d’une structure en nid-d’abeilles	59
2.1.3 Fabrication d’une âme en nid-d’abeilles.....	60
2.1.4 Des âmes alvéolaires au coussin en nid-d’abeilles	61
2.1.5 CAO d’un coussin en nid-d’abeilles	63
2.2 Modélisation numérique d’une alvéole	65
2.2.1 Rappels sur la méthode des éléments finis avec un problème mécanique ..	65
2.2.2 Modélisation d’une alvéole percée.....	67
2.3 Modélisation numérique multi alvéolaire	69
2.3.1 Dispositif expérimental de compression d’une couche alvéolaire	69
2.3.2 Modélisation éléments finis d’une couche alvéolaire.....	70
2.3.3 Modélisation du contact couche alvéolaire/demi-sphère déformable	72
2.4 Modélisation numérique du contact coussin fessier complet	76
2.4.1 CAO de l’ensemble coussin / fessier	77
2.4.2 Maillages du coussin et du fessier	77
2.4.3 Lois de comportement et gestion des contacts interfaciaux.....	79
2.4.4 Résultats numériques sur le plan mécanique	79
2.5 Discussion et conclusion du modèle numérique	85
Chapitre 3	87
Modélisation numérique du contact thermique coussin-fessier.....	87
Introduction.....	87
3.1 Contexte méthodologie	87
3.1.1 Problématique	87
3.1.2 Confort thermique	89
3.2 Notions d’échanges de chaleur.....	90
3.2.1 La conduction.....	91
3.2.2 La convection	91
3.2.3 Le rayonnement.....	92
3.3 Rappels sur la méthode des éléments finis en thermique.....	92

3.4 Echanges thermiques à l'interface fessier/coussin.....	93
3.4.1 Echanges thermiques pour une alvéole percée	95
3.4.2 Echanges thermiques multi-alvéolaires	98
3.4.3 Echanges thermiques fessier/coussin complet	99
3.5 Comparaison du modèle des coussins alvéolaire et mousse.....	103
3.6 Discussion et conclusion.....	105
Chapitre 4.....	106
Approche expérimentale	106
Introduction.....	106
4.1 Essais de compression.....	107
4.1.1 Compression d'un coussin : fessier et support rigides.....	107
4.1.2 Compression d'un coussin : fessier déformable et support rigide	110
4.1.3 Compression d'un coussin : fessier et support déformables	113
4.2 Essais de thermographie avec une caméra infrarouge.....	115
4.2.1 Protocole expérimental de la thermographie	115
4.2.2 Cartographie thermique des coussins	117
4.2.3 Discussions des résultats	124
4.2.4 Conclusion	126
4.3 Corrélation des résultats numériques et expérimentaux.....	127
4.3.1 Comparaison de la pression dans le cas d'un fessier rigide en bois.....	127
4.3.2 Comparaison de la pression calculée dans le cas d'un fessier déformable	130
4.3.3 Distribution de la température pour un coussin sans housse et un fessier déformable	131
4.3.4 Discussions.....	132
Conclusion et perspectives	133
Bibliographie.....	136
Annexes	145
Annexe 1.1 - Résumé des principaux travaux des auteurs utilisant la nappe de pression (cartographie de la pression) pour mesurer la pression distribution de l'interface fessier/coussin	148
Annexe 1.2 - Types, matériaux, avantages et inconvénients des coussins statiques	157
Annexe 1.3 - Résumé des principaux travaux sur les dispositifs expérimentaux	159
Annexe 1.4 - Résumé des principaux travaux sur les modélisations numériques.....	164

Annexe 2.1 - Les aspects théoriques afin de résoudre un problème de contact en mécanique entre deux corps élastique et hyper-viscoélastique173

Annexe 3.1 - Les aspects théoriques afin de résoudre un problème de contact en couplage thermomécanique entre deux corps élastique et hyper-viscoélastique.....178

Table des figures

Figure 1.1- Anatomie du bassin [5]	23
Figure 1.2 - Muscles du fessier visualises dans le plan sagittal [8]	24
Figure 1.3 - Schéma de la structure de la peau humaine [9]	25
Figure 1.4 - Description d'un fauteuil roulant manuel [22]	27
Figure 1.5 - Position d'assise ergonomique [5]	28
Figure 1.6 - Transmission des forces d'assise [5]	29
Figure 1.7 - Les positions d'assises normale et cyphose	29
Figure 1.8 - Diagramme des corps libres (DCL) au niveau du fessier en position [11]	30
Figure 1.9 - Escarres de pression en fonction de leur sévérité, grades 1 à 4.....	31
Figure 1.10 - Pression conduisant à l'ischémie [5]	32
Figure 1.11 - Illustration des déformations des tissus générées par la pression [30]	33
Figure 1.12 - Illustration des forces de pression et de friction [30].....	34
Figure 1.13 - Effet des contraintes de cisaillement sur les couches de tissu corporel	35
Figure 1.14 - La nappe de pression TexiMat® de la société TexiSence	38
Figure 1.15 - Caméra infrarouge, mesure de la température d'assise en fauteuil roulant [5]	39
Figure 1.16 - Mesure des caractéristiques de dissipation de la chaleur et de l'humidité. 40	40
Figure 1.17 - Illustration d'un modèle physique [56].....	43
Figure 1.18 - Étude du confort d'un siège automobile en mousse polyuréthane [69]	44
Figure 1.19 - Modèle et résultats d'Akins et al. 2011[49]	45
Figure 1.20 - Images des fessiers humains en bois (a) Jaworski [5] et (b) Hollington [67]	46
Figure 1.21 - Schéma du modèle fessier : (a) Chow et Odell [55] et (b) Dabnichki [58] ..	47
Figure 1.22 - Modèle éléments finis 2D du fessier et coussin d'Oomens et al. (2003) [60].	48
Figure 1.23 - Modèles fessiers numériques Verver et al. (a) [70] et Linder-Ganz et al. (b) [33].....	49
Figure 1.24 - CAO et modèles éléments finis d'un conducteur humain et de sièges véhicules	50
Figure 1.25 - Les modèles biomécaniques de fessier humain en littératures	51

Figure 1.26 - Modèles CAO et EF d'un contact fessier/coussin	52
Figure 1.27 - Montage expérimental utilisé sur des porcs [74]	53
Figure 1.28 - Mesure des propriétés mécaniques de tissus mous par indentation [76] ..	54
Figure 2.1 - Intérêts du coussin Stimulite® en nid-d'abeilles	58
Figure 2.2 - Architecture matricielle du nid-d'abeilles [79, 81]	59
Figure 2.3 - Procédés de fabrication d'une âme en nid-d'abeilles [82]	61
Figure 2.4 - Coussin plat Stimulite® modèle classique en nid-d'abeilles avec plusieurs couches	61
Figure 2.5 - Couche bleue transparente N°4 et bleue foncée Stimulite® SBS-2	62
Figure 2.6 - Description de la géométrie d'une alvéole perforée	63
Figure 2.7 - Structure alvéolaire d'une couche.....	63
Figure 2.8 - Illustrations des peaux horizontales d'un coussin nid-d'abeilles	64
Figure 2.9 - CAO 3D du modèle demi-coussin Stimulite® en nid-d'abeilles	64
Figure 2.10 - Illustration d'un problème mécanique.....	65
Figure 2.11 - Illustration de la géométrie et du maillage d'une alvéole percée	67
Figure 2.12 - Champs du déplacement U3 (mm) d'une d'alvéole : (a) Implicite ; (b) Explicite	68
Figure 2.13 - Courbes force-déplacement des calculs avec les méthodes implicite et explicite	68
Figure 2.14 - a) Échantillon SBS-1 ; b) Machine de traction/compression	69
Figure 2.15 - Géométrie et dimensions de l'échantillon SBS-1	69
Figure 2.16 - Modèle de l'échantillon SBS-1 avec les deux plaques rigides.....	70
Figure 2.17 - (a) Courbes force vs déplacement expérimentale et numériques ; (b) Isovaleurs du champ des contraintes de von Mises (en MPa) dans le cas « nœud contact » avec les valeurs du frottement 0,5 et 0,95.....	71
Figure 2.18 - (a) Courbes force vs déplacement expérimentale et numériques ; (b) Isovaleurs du champ des contraintes de von Mises (en MPa) dans le cas « général contact » avec les valeurs du frottement 0,5 ; 0,85 et 0,95.	71
Figure 2.19 - Courbes forces vs déplacement dans les cas numérique et expérimental ..	72
Figure 2.20 - Modélisation d'un contact demi-bille déformable/alvéoles percées.....	73
Figure 2.21 - Courbes force-déplacement pour une demi-sphère rigide ou déformable .	74

Figure 2.22 - Isovaleurs de la pression à l'interface demi-sphère (a) et alvéoles (b) (MPa)	75
Figure 2.23 - Contact demi-sphère déformable/alvéoles percées avec une peau interfaciale.....	75
Figure 2.24 - Pression interfaciale sur une demi-sphère avec une peau percée (MPa) ...	75
Figure 2.25 - CAO et maillage 3D d'un modèle EF humain/coussin	76
Figure 2.26 - CAO 3D et conditions aux limites d'un demi-fessier/coussin en nid-d'abeilles	77
Figure 2.27 - Maillage fessier rigide et coussin en nid-d'abeilles.....	78
Figure 2.28 - Maillage de coussin en nid-d'abeilles et de fessier déformable	78
Figure 2.29 - (a) Illustration du déplacement vertical dans le cas fessier rigide / coussin (mm) ;	79
Figure 2.30 - Déplacement vertical : (a) du coussin en nid-d'abeilles et (b) du fessier (mm)	80
Figure 2.31 - Pression de contact fessier déformable / coussin (MPa)	80
Figure 2.32 - Champs de contraintes de cisaillement de contact fessier/coussin (MPa).	81
Figure 2.33 - Courbe force Vs déplacement imposé : demi-modèle fessier déformable/coussin	81
Figure 2.34 - Modélisation de la housse de polyester et polyuréthane/Kevlar	82
Figure 2.35 - Champ de pression interfaciale fessier déformable/coussin avec housse (MPa)	83
Figure 2.36 - CAO du fessier humain avec la peau	83
Figure 2.37 - CAO du coussin nid-d'abeilles avec la housse et fessier avec la peau.....	84
Figure 2.38 - Déplacement (Y) sur le coussin sans et avec housse, fessier avec peau.....	84
Figure 2.39 - Pression de contact dans le cas d'un fessier avec peau.....	85
Figure 3.1 - Carte du champ thermique à l'interface corps/tissu humain après 20 minutes d'assise. [95].....	88
Figure 3.2 - Modèle EF pour évaluer le confort thermique d'un siège automobile [97] ..	88
Figure 3.3 - Champ thermique sur un mannequin vecteurs : (a) vitesse (b) température [101]	89
Figure 3.4 - Températures locales de la peau [97]	90
Figure 3.5 - Principe de la conduction	91

Figure 3.6 - Principe de la convection.....	91
Figure 3.7 - Principe du rayonnement	92
Figure 3.8 - Problème thermique	93
Figure 3.9 - Modélisation du transfert de chaleur fessier sans la peau/coussin.....	94
Figure 3.10 - Description de la géométrie d'alvéole perforée/ demi-sphère	95
Figure 3.11 - Champs de la température sur l'alvéole : (a) 5 s et (b) 10 s	96
Figure 3.12 - Température moyenne des 24 nœuds en surface de contact.....	97
Figure 3.13 - Champ de température sur la surface de contact de la demi-sphère : (a) 5 et (b) 10s.....	97
Figure 3.14 - Couche multi alvéolaire en contact thermique avec une demi-sphère	98
Figure 3.15 - Champs de température sur une couche multi alvéolaire (a) 5s et (b) 10s	99
Figure 3.16 - Champs de température sur la bille : (a) 5s et (b) 10s.....	99
Figure 3.17 - Distribution de la température à la surface du fessier humain.....	100
Figure 3.18 - Distribution de température à la surface d'un coussin en nid-d'abeilles..	101
Figure 3.19 - Distribution de la température à la surface du coussin en nid-d'abeilles.	101
Figure 3.20 - Champ de température entre le modèle fessier et coussin nid d'abeilles.	102
Figure 3.21 - Variations de la température nodale en surface contact fessier/nid-d'abeilles et dans un nid-d'abeilles	102
Figure 3.22 - Distribution du champ de température à la surface du coussin PU a) 10s b) 35min.....	104
Figure 3.23 - Distribution de la température sur la surface du fessier	104
Figure 3.24 - Distribution de la température entre le fessier et le coussin mousse PU .	105
Figure 4. 1 - Coussins utilisés pour les essais expérimentaux	106
Figure 4.2 - Nappe de mesure de la pression TexiMat®	107
Figure 4.3 - Fessier rigide en bois [5]	108
Figure 4.4 - Dispositif expérimental de compression d'un coussin.....	108
Figure 4.5 - Champs de pressions sur les coussins : fessier rigide en bois/support rigide	109
Figure 4.6 - Courbes forces appliquées en fonction du temps de mise en charge	110
Figure 4.7 - Essais de pression d'un fessier humain sur un coussin posé sur une surface rigide.....	111
Figure 4. 8 - Champs de pressions sur les coussins : fessier humain/support rigide.....	112

Figure 4.9 - Essais de pression d'un fessier humain sur un coussin posé dans un fauteuil pour handicapés	113
Figure 4. 10 - Champs de pressions sur les coussins : fessier humain/fauteuil.....	114
Figure 4.11 - Installation et mesures en fauteuil roulant.....	116
Figure 4.12 - Choix des zones de mesure suivant les appuis du sujet ayant participé ...	116
Figure 4. 13 - Cartographies thermiques de la surface du coussin ALV	118
Figure 4. 14 - Cartographies thermiques de la surface du coussin MOU	120
Figure 4.15 - Cartographies thermiques de la surface du coussin PUD	121
Figure 4. 16 - Variation des températures des 6 zones d'études des coussins avec la housse	122
Figure 4. 17 - Cartographies thermiques de la surface du coussin VISCO	122
Figure 4.18 - Température maximale dans la zone totale des 4 coussins mesurée.....	123
Figure 4. 19 - Température maximale dans la zone totale (zone N°6) des 4 coussins mesurée après 35 min d'appui	124
Figure 4.20 - Courbes force en fonction du déplacement sans la housse	128
Figure 4. 21 - Distribution de la pression de contact fessier-rigide/coussin sans housse.	128
Figure 4.22 - Courbes force-déplacement pour un coussin avec housse.....	129
Figure 4. 23 - Distribution de la pression à l'interface fessier-rigide/coussin avec la housse ;	129
Figure 4.24 – Pression calculée à l'interface fessier déformable /coussin.....	130
Figure 4. 25 - Distribution de la température sur le coussin nid-d'abeilles sans la housse	131

Liste des tableaux

Tableau 2.1 - Données hyper-viscoélastiques du matériau TPU [89]	67
Tableau 2.2 - Données les propriétés des matériaux demi-sphère déformable	73
Tableau 3.1- Propriétés thermiques du tissu fessier et du coussin en nid-d'abeilles.....	95
Tableau 3.2 - Propriétés thermiques de la bille (tissus musculaires) et de l'alvéole (TPU)	95
Tableau 3.3 - Maillage d'une alvéole perforée en contact avec une demi-sphère.....	96
Tableau 3.4 - Données du maillage des alvéoles perforées avec la demi-sphère.....	98
Tableau 3.5 - Données maillage éléments finis coussin en nid-d'abeilles et le fessier humain.....	100
Tableau 3.6 - Données éléments finis coussin en solide polyuréthane et le fessier humain	103
Tableau 3.7 - Propriétés thermiques du fessier et du coussin solide en PU [97, 109, 110]	104
Tableau 4.1 - Répartition de température à 6 zones d'observation du coussin ALV après 35 min.....	119
Tableau 4.2 - Répartition de température à 6 zones d'observation du coussin MOU après 35 min.....	119
Tableau 4.3 - Répartition de température à 6 zones d'observation du coussin PUD après 35 min.....	120
Tableau 4.4 - Répartition de température à 6 zones d'observation du coussin VISCO après 35 min.....	123

Liste des annexes

Annexe 1.1 - Résumé des principaux travaux des auteurs utilisant la nappe de pression (cartographie de la pression) pour mesurer la pression distribution de l'interface fessier/coussin

Annexe 1.2 - Types, matériaux, avantages et inconvénients des coussins statiques

Annexe 1.3 - Résumé des principaux travaux sur les dispositifs expérimentaux

Annexe 1.4 - Résumé des principaux travaux sur les modélisations numériques

Annexe 2.1 - Les aspects théoriques afin de résoudre un problème de contact en mécanique entre deux corps élastique et hyper-viscoélastique

Annexe 3.1 - Les aspects théoriques afin de résoudre un problème de contact en couplage thermomécanique entre deux corps élastique et hyper-viscoélastique.

Liste des symboles et abréviations

OMS	Organisation Mondiale de la Santé
FRM	Fauteuil Roulant Manuel
NPUAP	National Pressure Ulcer Advisory Panel
EPUAP	European Pressure Ulcer Advisory Panel
P	La pression
F	La force
Fr	La force de réaction d'assise
Fi	La force de réaction au niveau des ischions
Ft	La force de réaction au niveau des trochanters
S	La surface
τ	Contrainte de cisaillement
IMC	Indice de Masse Corporelle
RCLI	Rigid Cushion Loading Indenter (Pénétrateur de chargement rigide pour coussin)
MEF	Méthode des Éléments Finis
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
W	Énergie totale
\bar{I}	Tenseur des déformations déviatorique
J	Jacobien des déformations
J ^{el}	Ratio volume élastique
C ₁₀ , C ₀₁ ,	
C ₁₁ , D ₁	Les paramètres dépendants du matériau
G	Module de cisaillement
G ₀	Module de cisaillement instantané
G _i	Module relaxation
τ_i	Temps de relaxation
TPU	Thermoplastique Polyuréthane
e _d	Épaisseur double de la paroi de l'alvéole
e _s	Épaisseur simple de la paroi de l'alvéole
H	Hauteur de l'alvéole (nid d'abeilles)

\vec{f}_d	Force volumique
\vec{t}	Force surfacique
\vec{t}_c	Force de contact
$\underline{\sigma}$	Tenseur des contraintes
u	Déplacement
\underline{D}^e	Tenseur des taux de déformations élastiques
SI	Statique Implicite
DE	Dynamique Explicite
Δt	Incrément de temps
v	Vitesse de déplacement
[M]	Matrice masse
E	Module de Young
ν	Coefficient de Poisson
ρ	Masse volumique
q	Flux de chaleur
\bar{q}	Flux de chaleur imposé par les conditions limites de type Neumann
Q	Flux volumique des sources de chaleur
C_v	Chaleur massique
k	Conductivité thermique
T	Température
t	Temps
ξ	Facteur d'émission
φ	Constante de Stefan