N° d'ordre: H395

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

présentée à

L'Université des Sciences et Technologies de Lille 1

par

Pascal BRUNIAUX

Docteur en Automatique et Informatique Industrielle

MODELISATION, IDENTIFICATION ET SIMULATION DE STRUCTURES TEXTILES

Soutenue le 18 Novembre 2003 devant le jury d'examen composé de :

Rapporteurs:

BILLOET J.L., Professeur, Université d'Orléans GATEV G.I., Professeur, Université Technique de Sofia (Bulgarie) RACHID A., Professeur, Université Jules Verne de Picardie

Examinateurs:

BORNE Pierre, Professeur, Ecole Centrale de Lille CASTELAIN Jean Marie, Professeur, ENSAIT SHAHROUR Isam, Professeur, Université de Lille 1 VASSEUR Christian, Professeur, Université de Lille 1

Habilitation à diriger des recherches, préparée sous la direction de Monsieur le Professeur C. VASSEUR, aux laboratoires GEMTEX et I3D de Lille

PARTIE.I4			
I.1. CURRICULUM VITAE	5		
I.1.1 Etat civil	5		
I.1.2 Cursus universitaire			
I.1.3 Activités professionnelles			
I.2. ACTIVITES DE RECHERCHE	7		
I.2.1 Stratégie de recherche	7		
I.2.2 Descriptif des recherches			
I.2.2.1 Thématique modélisation			
I.2.2.2 Thématique identification	12		
I.2.2.3 Thématique simulation/commande			
I.2.4 Bilan synthétique de la production scientifique			
I.2.5 Production scientifique (36 références)			
I.2.6 Participation à l'activité de la communauté scientif			
I.2.7 Participation à la valorisation			
I.2.8 Collaborations scientifiques			
•			
I.3. ACTIVITES PEDAGOGIQUES	27		
I.3.1 Formation initiale	29		
I.3.1.1 Cours magistraux	29		
I.3.1.2 Travaux DirigésI.3.1.3 Travaux Pratiques			
I.3.1.4 Encadrement de mémoires de fin d'études (dernière anno	ée)31		
I.3.2 Formation Continue			
I.3.2.1 Mission régionale			
I.3.2.2 Missions étrangères			
I.4. RESPONSABILITES COLLECTIVES	36		
I.4.1 Organisation pédagogique de l'ENSAIT	36		
I.4.1.1 Direction des études			
I.4.1.2 Responsabilité d'un centre de concours de l'ENSAIT	37		
I.4.1.3 Responsabilité des laboratoires de CA0			
I.4.2.1 Relations avec les institutions			
I.4.2.2 Relations avec les industriels			
I.4.3 Fonctions électives			
I.4.3.1 Conseil scientifique			
I.4.3.2 Conseil d'administration			
I.5. Conclusions et Perspectives	38		

PARTIE.II	40
II.1. MODELISATION	41
II.1.1 Introduction	41
II.1.1.1 Réflexion sur la modélisation	
II.1.1.2 Modélisation des structures textiles	
II.1.1.3 Positionnement des travauxII.1.2 Modèle appliqué au th	
II.1.2.1 Modèle surfacique 3D du tissu [Th1][P3][P8]	
II.1.3 Modèles appliqués aux TuTs	
II.1.3.1 Modèle linéique 2D de fil (PFD) [Th2][P4][P7]	
II.1.3.2 Modèle volumique 3D de tissu (PFD) [Th2]	
II.1.4 Conclusion	
II.2. IDENTIFICATION	
II.2.1 Introduction	
II.2.2 Identification du modèle applique au TH [P3]	
II.2.2.1 Epaisseur du tissu :	
II.2.2.3 Coefficients de résistance à l'allongement w_{11}^1 , w_{22}^1 :	
II.2.2.4 Coefficients de résistance au cisaillement $w_{12}^1 = w_{21}^1$:	
II.2.2.5 Coefficients de résistance à la flexion w_{11}^2 , w_{22}^2 :	
II.2.2.6 Coefficients de résistance à la torsion $w_{12}^2 = w_{21}^2$:	
II.2.3 Identification du modele appliqué aux TuTs	
II.2.3.1 Sensibilité des paramètres du modèle de fil en dynamique [P4]	76
II.2.3.3 Discussion sur les essais et leurs sensibilités :	
II.2.3.4 Identification des coefficients de flexion dynamique et de viscosité [P5	
II.2.3.5 Identification du coefficient de flexion statique [DEA12][P6]	
II.2.3.7 Identification du sous modèle de traction complet [Th2][DEA10]	
II.2.4 Conclusion	96
II.3. SIMULATION	97
II.3.1 Introduction	97
II.3.2 Simulation du modele TH [Th1][P3][P8]	98
II.3.2.1 Simulation du tissu par la méthode des éléments finis	98
II.3.2.2 Influence sur le comportement dynamique du système	
II.3.2.3 Influence sur la position d'équilibre du tissu	
II.3.3 Simulation du modèle TuT	
II.3.3.1 Simulation d'un fil par le lagrangien [P6][DEA12]	103
II.3.3.2 Simulation d'un tissu par le PFD [Th2][P7] [28]	
II.4. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	120
II.5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	124

PARTIE.I

SYNTHESES DES ACTIVITES DE RECHERCHE, D'ENSEIGNEMENT ET DE RESPONSABILITES COLLECTIVES

P.BRUNIAUX - 4/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

I.1. CURRICULUM VITAE

Pascal BRUNIAUX

Maître de Conférences

Adresse Administrative	Adresse Domicile
ENSAIT/GEMTEX	
9, rue de l'Ermitage	
59056 Roubaix Cedex 1	
2 : 03 20 25 64 85	
Fax: 03 20 24 84 06	
E-Mail: pascal.bruniaux@ensait.fr	

I.1.1 Etat civil

Section CNU: 61

Profil: Génie Informatique, Automatique et Traitement du

Signal

Nom patronymique : BRUNIAUX

Prénom : Pascal

NUMEN: 09S9332212RHK

Date et Lieu de naissance : 15 Novembre 1959 à DENAIN (NORD)

Nationalité: Française

Situation de famille : Marié, 2 enfants

Guillaume né le 5 janvier 1989

Robin né le 3 mai 1993

Fonctions : Maître de Conférences

Date de nomination : 1^{er} Octobre 1990

Etablissement actuel: Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries

Textiles de Roubaix

Laboratoire d'affectation : Laboratoire de GEnie et Matériaux TEXtiles, ENSAIT

I.1.2 Cursus universitaire

Doctorat de Troisième Cycle en Automatique et Informatique Industrielle,

Titre: « Contribution à la modélisation non linéaire, à l'identification et à la commande en boucle ouverte des moteurs pas à pas »,

soutenue le 19 décembre 1988 à l'Université des Sciences et Technologies de Lille,

Jury : Vidal P., Professeur à l'Université de Lille1 (président),

Povy L., Professeur à l'Université de Lille1 (directeur de recherche), ,

Goeldel C., Professeur à l'Université de Reims (rapporteur),

Laurent R., Professeur à l'Université d'Orléans (rapporteur),

Pinchon D., Maîtres de Conférences à l'Université de Lille 1 (examinateur),

Vittu M., Directeur de l'Ecole des Hautes Etudes Industrielles (invité),

Mauger D., Directeur Technique de la société SOCITEC (invité),

Mention Très Honorable.

➤ **Diplôme d'Etudes Approfondies** en Automatique et Informatique Industrielle, Université des Sciences et Technologies de Lille (1983).

Directeur de recherche : Povy L., professeur, Université de Lille1.

- ➤ **Maîtrise** d'Electronique, d'Electrotechnique et d'Automatique, Université des Sciences et Technologies de Lille (1982).
- ➤ **Diplôme d'Etudes Universitaires Générales** en Mathématiques et Sciences Physiques, Université des Sciences et Technologies de Lille (1980).
- ➤ **Diplôme Universitaire de Technologie** en Génie Electrique, option Automatique, Université des Sciences et Technologies de Lille (1979).

I.1.3 Activités professionnelles

- 1990-2003 Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT) à Roubaix.
- **1989-1990 Enseignant chercheur** à l' **E**cole des **H**autes **E**tudes **I**ndustrielles (E.H.E.I.) de Lille.
- 1985-1989 Attaché de recherche à l' Ecole des Mines de Paris.
- 1984-1985 Volontaire Formateur en Informatique (service militaire) à l' Ecole Supérieure des Techniques Industrielles et des Textiles (E.S.T.I.T.) de Villeneuve d'Ascq
- 1983-1984 Formateur en formation continue à l' Ecole Supérieure des Techniques Industrielles et des Textiles.
- 1990-1995 Président du conseil de surveillance à S.A. CORIOLIS à Villeneuve d'Ascq

I.2. ACTIVITES DE RECHERCHE

Cette section présente les différentes activités de recherche que j'ai co-encadrées depuis ma nomination à l'ENSAIT, en octobre 1990, comme maître de conférences. Elle regroupe à la fois des activités amont et des activités de recherche industrielle.

Le fondement de mes recherches concerne la modélisation, l'identification et la simulation des systèmes non linéaires. Dans un premier temps, cette activité s'est déclinée dans le cadre de l'étude des actionneurs incrémentaux, suite à mes travaux de thèses de 3^{ème} cycle. Dans un second temps, elle s'est orientée vers la modélisation des structures textiles, dans laquelle je me suis spécialisé compte tenu des orientations de l'ENSAIT.

La période concernée (1990-actuellement) a largement coïncidé avec la mise en place du laboratoire de l'école (Laboratoire GEMTEX : GEnie et Matériaux TEXtiles) qui a été créé ex nihilo en janvier 1992. Dans ce sens, un rapide historique permet de comprendre l'évolution de ma contribution scientifique au sein de l'ENSAIT.

En effet, lors de mon arrivée (fin 1990), l'activité de recherche dans cette école était embryonnaire. C'est la raison pour laquelle j'ai travaillé dans un premier temps dans la continuité de ma thèse. En janvier 1992, la création du GEMTEX comme jeune équipe (JE290) a conduit à une structuration complète de la recherche à l'ENSAIT, selon des thématiques fortement liées aux orientations de l'école (activités tournées vers le secteur textile).

C'est dans ce contexte que le conseil scientifique du GEMTEX m'a proposé de participer à la mise en place du thème de recherche « Modélisation et simulation des structures textiles ». L'objectif scientifique de ce thème est de développer et d'adapter les méthodes de l'automatique pour résoudre les problèmes spécifiques rencontrés dans la caractérisation, la modélisation et la simulation du comportement dynamique des matériaux textiles. La mise en place de cette nouvelle activité a nécessité de ma part un effort important de reconversion. En effet, je souhaite montrer comment l'automatique peut contribuer, par son approche et son formalisme, au développement d'un thème pluridisciplinaire à prédominance mécanique. Cette démarche s'est concrétisée par une production scientifique dans des revues, dès 1997.

Dans la suite, je présente dans un premier temps les objectifs fondamentaux de mes recherches en précisant comment elles s'inscrivent dans le contexte économique et scientifique de la recherche textile française. Dans un second temps, je détaille les différentes méthodes développées pour atteindre ces objectifs.

I.2.1 Stratégie de recherche

Comme dans la plupart des secteurs industriels, le textile n'échappe pas à la nécessité économique de développer des outils de CAO pour de multiples usages.

Par exemple, en confection, la représentation du drapé d'un tissu sur un mannequin virtuel statique voire dynamique permet de simuler le comportement d'un vêtement avant même de l'avoir confectionné. Ceci présente l'intérêt économique évident d'accélérer la phase de conception et de réduire fortement les coûts de création de nouveaux produits. L'utilisation de ce mode de représentation des tissus est également très développée dans les magasins virtuels qui prennent une place de plus en plus importante dans le commerce électronique.

Autre exemple, lorsqu'on utilise des textiles dits intelligents (tissu respirant, tissu chauffant, tissu de protection électromagnétique, etc.), le positionnement par rapport au corps est

déterminant, car la plupart des fonctionnalités du vêtement sont directement liées aux zones corporelles à traiter.

Dans le secteur des Textiles à Usages Techniques (TuT), le prototypage permet de concevoir des échantillons virtuels de tissu. L'intérêt de cette phase est de prédire les spécifications techniques d'un échantillon uniquement à partir des caractéristiques du matériau de base (fil). De la même manière, la mise en place d'essais simulés en fonction de critères techniques imposés représente, elle aussi, une réelle avancée économique, dans la mesure où elle permet, par principe, de se dispenser d'utiliser ou de concevoir des bancs de tests spécifiques souvent très coûteux. La particularité de la modélisation et de la simulation des TuTs par rapport à la modélisation en habillement réside dans l'intégration de contraintes physico-chimiques spécifiques. Ce concept peut évidemment s'étendre à tout dispositif intégrant des matériaux soumis à des contraintes mécanique : structures tendues (chapiteaux, vélums, voiles de bateaux, stores ...), structures gonflables (citernes, objets publicitaires, airbags...), textiles de protection (gilet pare-balles), etc.

Dans ce contexte, il apparaît que le développement d'une CAO performante pour le textile nécessite une démarche scientifique recouvrant des domaines de compétences multiples. Ce besoin a été parfaitement identifié depuis plusieurs décennies aux USA, où la recherche textile est très active. En France, peu de travaux sont développés dans le secteur de la CAO Textile. La démarche entreprise au GEMTEX et plus particulièrement dans l'équipe « Modélisation et simulation des structures textiles » vise donc à combler un besoin stratégique de recherche dans le secteur textile français. La mise en place d'une équipe pluridisciplinaire composée d'automaticiens, de mécaniciens, d'informaticiens et de textiliens semble constituer la meilleure démarche dans ce sens. La stratégie de recherche est alors définie selon le schéma de la Figure I-1. Cette stratégie vise à bâtir un univers textile virtuel aussi proche que possible de l'univers réel. Pour cela, le volet virtuel fait apparaître 3 étapes : la modélisation, l'identification et la simulation. Ces trois étapes sont rendues interactives et adaptatives afin de corriger toute erreur de modélisation et/ou d'identification conduisant à une simulation irréaliste.

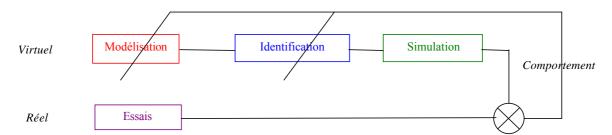


Figure I-1 : Stratégie interactive de recherche

Actuellement, les outils de simulation développés dans le secteur textile sont, pour la plupart, basés sur l'omniprésente méthode des éléments finis. Toutefois ces outils trouvent rapidement leurs limites, car ils ne prennent pas suffisamment en compte la nature du matériau textile, qui se situe dans le domaine du viscoélastique non-linéaire et qui est donc extrêmement complexe à appréhender. Par ailleurs ils n'intègrent pas la réalité des paramètres spécifiques du textile, tels que, par exemple, l'allongement en chaîne, l'allongement en trame, le retrait, l'embuvage, etc. L'objectif de notre équipe est donc d'apporter un éclairage d'automaticien, tout en tenant compte de l'expertise textile, afin de développer de nouvelles méthodes de modélisation, d'identification et de simulation des textiles.

En ce qui concerne la modélisation des textiles, nous avons élaboré plusieurs modèles spatiotemporels dans des espaces géométriques à 2 et 3 dimensions. Ceci nous a permis de décrire le comportement dynamique d'un fil ou d'une structure tissée. Plus précisément, l'approche 2D vise à modéliser l'évolution d'un fil à l'état libre, tandis que l'approche 3D permet de modéliser les interactions entre les fils dans une structure tissée. Dans les deux cas, nous nous plaçons évidemment dans un contexte dynamique. L'approche multi-modèles permet de choisir, dans une banque de modèles, le modèle le plus apte à répondre aux besoins de l'application. Par exemple, dans le cas des objets déformables, nous utilisons un modèle surfacique. Par contre, dans le cas de la simulation d'essais, nous utilisons des modèles 2D ou 3D selon qu'il s'agit de fil ou de tissu. Cette démarche vise à répondre aux besoins des utilisateurs travaillant dans le monde de la réalité virtuelle. Enfin, la mise en place de différents formalismes de modélisation positionne clairement nos travaux dans l'ensemble de la communauté scientifique (mécaniciens, automaticiens, textiliens) travaillant sur ce thème.

Les méthodologies mises en place pour l'identification des différents modèles obtenus visent à développer des outils puissants d'accès à la globalité des paramètres intrinsèques d'un fil ou d'un tissu. Dans notre cas, nous sommes confrontés à des modèles complexes contenant un nombre important de paramètres. C'est la raison pour laquelle nous avons pris le parti de hiérarchiser l'identification en décomposant chaque modèle en sous-modèles restreints à une classe de paramètres associée à un type de comportement. Chaque comportement est, lui même associé à un type de test spécifique (traction, cisaillement, etc.). Cette démarche permet d'obtenir l'ensemble des paramètres d'un modèle avec un minimum de tests physiques. Nos travaux antérieurs sur les systèmes non linéaires (actionneurs incrémentaux) ont été utiles pour éclairer notre démarche scientifique. En effet, ils ont mis en évidence que la décomposition d'un modèle en sous-modèles garantit une meilleure convergence des algorithmes d'identification non linéaires en réduisant l'espace paramétrique, sans pour cela modifier le modèle.

Les outils de simulation mis en place ont pour objectif de valider les différents modèles élaborés. Pour cela nous reprenons la stratégie d'identification par décomposition du modèle global en sous-modèles. La validation de chaque sous-modèle passe nécessairement par la simulation des tests associés à ces sous-modèles et la comparaison des résultats simulés avec ceux issus des essais réels. Des techniques de sur-échantillonnage et de prédiction ont été intégrées dans les algorithmes de simulation afin de résoudre les problèmes relatifs au changement d'échelle fil/tissu et d'accélérer la convergence des algorithmes de simulation du modèle 3D. Actuellement, les simulations sont réalisées dans un environnement normalisé (conditionnement de 48 heures, hygrométrie 65%, Température 20°). Nous envisageons, dans la suite des travaux, de faire évoluer nos méthodes vers la simulation des structures textiles soumises à un environnement variable. Cet aspect sera développé dans la présentation de nos perspectives de recherche.

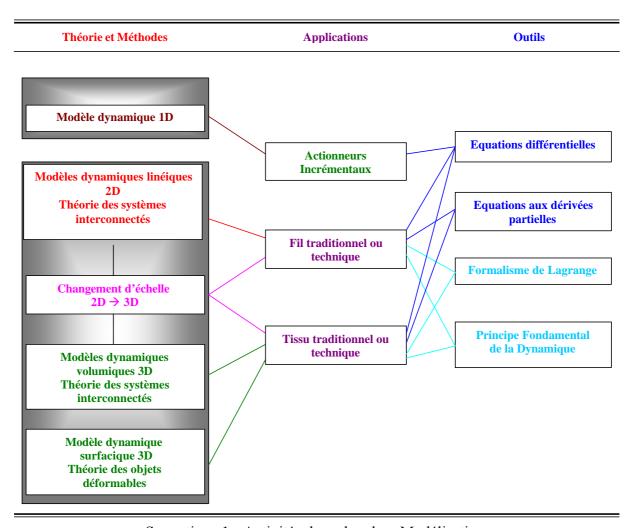
La section suivante donne un descriptif plus détaillé des différents aspects de ces recherches qui ont été développés dans le cadre des thèses que j'ai co-encadrées [**Th1**], [**Th2**] et [**Th3**] ¹.

I.2.2 Descriptif des recherches

Pour chaque thématique, nous présentons un synoptique faisant apparaître les «Théories et Méthodes » développées, ainsi que les « Outils » exploités. Les travaux finalisés sont, quant à eux, répertoriés au centre de chaque synoptique, dans la rubrique « Applications ». La présentation s'accompagne de liens avec la production scientifique associée : thèses [Thi], publications dans des revues [Pj] ou présentation dans des congrès [Ck].

¹ Les repères **[Thi][DRTj][DEAk]** renvoient à la liste « Encadrement de Thèses, de DRT et de DEA », § 1.2.3.

I.2.2.1 Thématique modélisation



Synoptique 1 - Activités de recherche - Modélisation

Cette thématique vise à mettre en place les différents modèles de fils ou de tissus qui seront intégrés dans une CAO de prototypage ou d'essais virtuels spécifiques. Différentes pistes de recherche ont été explorées selon les objectifs de simulation souhaités. L'élaboration de chaque modèle de fil ou de tissu s'est effectuée selon deux formalismes : le formalisme de Lagrange et le Principe Fondamental de la Dynamique (PFD). Chacun de ces formalismes a ses avantages et ses inconvénients dépendant de l'application envisagée. Par ailleurs, l'interaction entre les travaux menés sur le modèle de fil et le modèle de tissu permet de réactualiser en permanence le modèle de tissu volumique 3D. Ceci permet, en outre, de mieux maîtriser le changement d'échelle fil/tissu. Ainsi, la création d'une base de données fil suffit à la connaissance complète d'un processus allant du matériau de base (fil) à des structures volumiques complexes 3D, qui se caractérisent non seulement par le type de fil utilisé en chaîne et/ou en trame, mais encore par le mode de liage utilisé (armure) ou par les conditions de traitement physico-chimiques issues de l'enduction. Toutefois, dans le cas du modèle surfacique 3D, nous n'échappons pas à la nécessité de créer une base de données tissu. La présentation qui suit montre les approches que nous avons menées sur les modèles de fil et de tissu.

Modèles de fil:

La mécanique du point matériel montre que deux approches peuvent être utilisées pour modéliser le fil. Mais quelle que soit l'approche utilisée, la représentation du fil conduit à un modèle unique linéique 2D.

Dans une première approche, nous avons pris le parti d'utiliser le formalisme de Lagrange pour simuler dans un plan vertical le tombé d'un fil soumis uniquement aux forces de la pesanteur [C19][P1][DEA6]. Ces premiers travaux de modélisation ont été volontairement limités à un environnement mécanique absent de contraintes, car les outils de calcul disponibles à l'époque de l'étude ne permettaient pas d'intégrer au modèle les efforts résultant des contraintes extérieures. Le développement de nouvelles méthodes numériques présentées dans la thématique simulation a permis la continuité de ces travaux quelques années plus tard. Ainsi, par l'utilisation de techniques modernes de résolution de type DAE (Differential Algebraic Equations) incluant des BDF (Backward Differentiation Formulas), il a été possible de simuler un fil soumis à des contraintes statiques et dynamiques [P6], [Th3].

L'autre technique considère le fil comme un ensemble de sous systèmes interconnectés. Chaque sous système, appelé cellule, est assimilé à un ensemble de barres viscoélastiques. Ce principe a été repris pour le tissu (cf. Figure I-2). Ainsi, un effort appliqué à une extrémité du fil est propagé de cellule en cellule [C24][P4]. Dans ce cas de figure, nous utilisons le PFD qui se prête mieux à résoudre l'équilibre des forces mises en jeu.

La comparaison entre ces deux techniques montre que le premier modèle conduit à des temps de calcul des différentes simulations nettement plus courts. Toutefois, dans l'état actuel des travaux, il reste à vérifier si le domaine de validité n'est pas trop restreint.

Modèles de tissu:

La mise en place d'un modèle de tissu dépend de l'utilisation envisagée pour celui-ci. Selon que l'on se situe dans le secteur habillement ou dans le secteur des TuTs [**DEA10**], on peut envisager deux types de modèles : le modèle surfacique 3D et le modèle volumique 3D. Alors que le modèle surfacique 3D vise à réaliser un rendu géométrique pour des synthèses d'images, le modèle volumique 3D vise à rendre compte du comportement physique intime du tissu et nécessite donc une plus grande finesse dans la mise en place des essais simulés.

Dans le cas du modèle surfacique 3D, nous nous sommes appuyés sur la théorie des objets déformables [C22]. Les équations du modèle font apparaître des termes traduisant la déformation surfacique. Ce modèle a été développé afin de décrire l'évolution d'un tissu soumis aux forces de pesanteur (tombé et drapé d'un tissu) [C20], [C21], [[P8]] et [Th1]. Dans cette modélisation, ni l'épaisseur du tissu ni les contraintes forcées ne sont prises en compte.

Dans le cas du modèle volumique 3D, nous nous sommes intéressés au changement d'échelle [C25] entre le fil et le tissu. L'idée est de considérer le tissu comme un ensemble ordonné de fils. Ce modèle s'attache à définir, selon l'armure, la configuration géométrique des fils à l'intérieur du tissu après l'opération de tissage (cf. Figure I-2). Le modèle est décrit à partir des points de croisure constituant le tissu selon sa contexture. Chaque intersection d'un fil de chaîne et d'un fil de trame est représentée sous la forme de deux masses reliées par des segments. Ce modèle est alors représenté par un système de cellules interconnectées représentant l'entrecroisement des fils. L'évolution de ce système est régie par les lois de la dynamique dans un espace à 3 dimensions [P7]. C'est un modèle complet qui prend en

compte les critères physiques de conception du tissu (épaisseur, tissage, armure...) et qui gère les contraintes mécaniques [C23], [Th2].

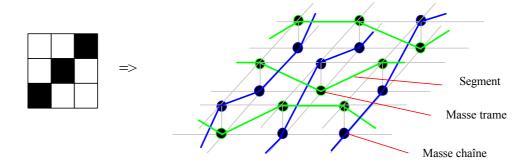
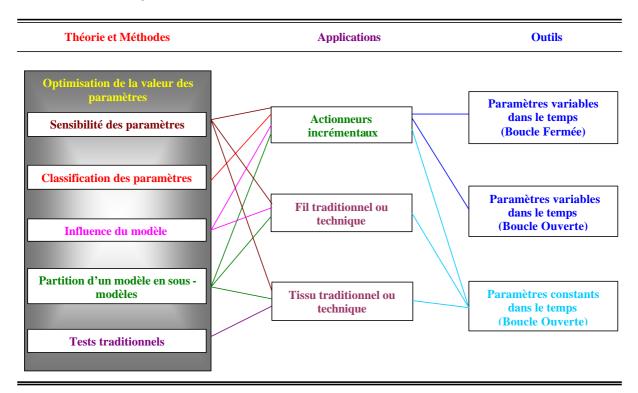


Figure I-2 : Exemple de structure tissée en fonction d'une armure donnée

Le modèle surfacique 3D conduit à des temps de calculs particulièrement intéressants. Toutefois, il ne rend pas compte de la dynamique d'un tissu avec autant de réalisme que le modèle volumique 3D. Par contre, la complexité de ce dernier limite à l'heure actuelle la taille de l'échantillon simulé.

I.2.2.2 Thématique identification



Synoptique 2 - Activités de recherche - Identification

L'objectif de cette thématique est d'identifier les paramètres des modèles précédemment définis.

Dans le cas du modèle surfacique, qui a été le premier modèle développé, nous avons utilisé des machines de tests textiles afin de caractériser des échantillons réels [**Th1**]. Cette démarche, qui nous a permis de mieux appréhender la diversité des matières textiles, a conduit à la définition d'un vecteur de paramètres textiles caractérisant le tissu dans sa

P.BRUNIAUX - 12/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

globalité [P3]. Les échantillons confectionnés ont permis de faire varier les paramètres indépendamment les uns des autres et de vérifier ainsi diverses influences : influence de la nature du fil, influence de la permutation du fil chaîne / fil trame, influence de l'armure, etc.

En ce qui concerne les autres modèles (linéique 2D et volumique 3D), nous avons exploité les résultats de travaux antérieurs [C1][C6][DEA3][DEA5], dans lesquels une stratégie d'identification des systèmes non linéaires à paramètres variables a été développée. Pour cela, quatre volets sont considérés :

- classification des paramètres [Thèse],
- > partition d'un modèle en sous-modèles [C8],
- > sensibilité des paramètres,
- influence du modèle d'étude [C7].

<u>Classification des paramètres-Partition en sous-modèles</u>:

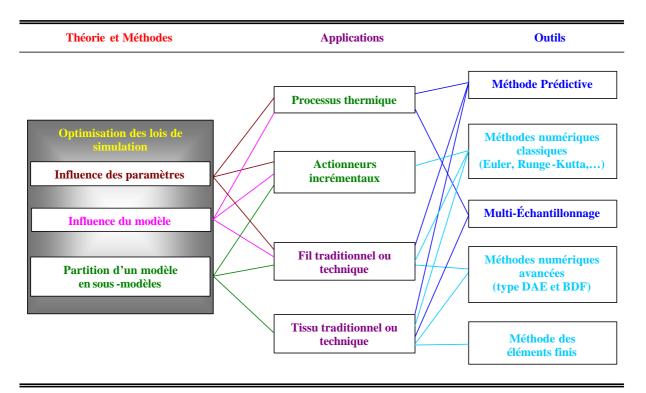
Le nombre important de paramètres à identifier suggère de partitionner l'espace des paramètres en sous-espaces (classification des paramètres), afin de décomposer le modèle en sous-modèles. Chaque sous-modèle regroupe des paramètres ayant des affinités communes (critère de classification) et il peut être assimilé à la représentation d'un comportement statique ou dynamique donné, comme par exemple modèle de traction, modèle de flexion [P5], modèle de poinçonnement, etc. De plus, pour certains sous-modèles, la classification a été affinée pour distinguer modèles statiques (liés aux petites déformations du matériau) et modèles dynamiques (liés aux grands déplacements du matériau). De ce fait, il a été nécessaire de mettre en oeuvre des moyens de mesures adaptés à chaque comportement [Th2].

Sensibilité des paramètres-Influence du modèle d'étude :

La sensibilité des paramètres de chaque sous-modèle a été étudiée, afin d'évaluer comment certains paramètres peuvent en masquer par d'autres [P4]. Il est important de préciser que ces études ont été menées pour les deux formalismes. Toutefois, dans le formalisme de Lagrange, nous avons pu, en outre, tester la sensibilité des paramètres aux contraintes statique et cinématique. Par ailleurs, l'analyse de la forme prise par un échantillon de fil a permis d'améliorer l'identification des paramètres agissant sur la déformation du matériau.

L'ensemble de ces travaux a essentiellement conduit à l'identification des paramètres physiques d'un fil. Ceci suffit car notre modèle de tissu découle directement du modèle de fil, sans qu'il soit nécessaire d'introduire des paramètres physiques supplémentaires liés à la structure du tissu.

I.2.2.3 Thématique simulation/commande



Synoptique 3 - Activités de recherche - Simulation/Commande

La stratégie de ce thème est de valider les différents modèles mathématiques de tissu que nous avons proposés. Différents essais ont été utilisés en fonction du modèle de tissu afin d'assurer une continuité parfaite avec les travaux d'identification et d'être en conformité avec les objectifs industriels. Par exemple, dans le cas d'un modèle surfacique, il est important de comparer le tombé d'un tissu (état transitoire), sa positon d'équilibre (état stable), avec la réalité de ce comportement; comme cela se produit sur un mannequin dynamique (modèle de présentation de collection) ou statique (modèle de création). Le modèle volumique 3D nécessite de vérifier si la partie géométrique du modèle traduit bien la structure du tissu. Pour cela, nous avons mis en place des essais simulés de traction et de poinçonnement et vérifié le suivi de trajectoire des courbes simulées et réelles traduisant la déformation de la structure tissée. Nous avons volontairement adopté le même type d'essais pour le fil et le tissu afin d'évaluer l'influence des paramètres du fil dans le tissu. Rappelons l'importance de la conformité des essais pour la mise en place d'une CAO de prototypage virtuel de tissu. Selon le modèle employé, différents outils de l'automatique et de la mécanique ont été utilisés et associés :

- > méthode prédictive,
- > multi-échantillonnage,
- > multiplicateurs de Lagrange et commande associée,
- > méthode des éléments finis.

Modèle linéique 2D:

Le modèle linéique de fil que nous avons développé a été mis en œuvre pour simuler l'évolution de celui-ci en l'absence de contraintes (régime libre). Lorsque des contraintes

mécaniques externes se traduisent par un allongement de tissu, la résolution des équations relatives au modèle est effectuée en utilisant le formalisme des multiplicateurs de Lagrange. Le vecteur des multiplicateurs de Lagrange peut alors être assimilé à un vecteur de commande, dans le contexte de la simulation. Plus précisément, nous avons adopté une approche de type dynamique inverse qui implique la résolution d'un ensemble d'équations algébriques différentielles (DAE) comprenant les équations propres du système et les équations de contrainte [[P6]]. Avec une telle approche, la diversité des contraintes permet de tester différents types de comportements dynamiques, que nous avons validés selon différents tests [DEA11][DEA12].

Modèle volumique 3D:

La simulation du modèle volumique 3D nécessite la mise en oeuvre de nombreuses méthodes de l'automatique telles que la prédiction et le multi-échantillonnage. Lors du développement du logiciel de simulation, nous avons été confrontés à des problèmes de temps de calcul. Pour accélérer celui-ci, nous avons adopté une approche prédictive propre à notre système [Th1]. Dans ce cadre, les travaux sur la commande prédictive de processus thermiques ou d'actionneurs incrémentaux [C6][C11][C12][C13][C17][C18][P2][DEA1][DEA7][DEA8] développés en collaboration avec mon collègue V.Koncar ont été largement adaptés et exploités pour la simulation des modèles volumiques 3D. Par ailleurs, le multiéchantillonnage a été introduit lors de la simulation des tests (régime forcé ou contraint), pour qualifier deux échelles de temps. La première échelle, appliquée au système global (c'est à dire au tissu) traduit des phénomènes lents résultant de la dynamique imposée par les contraintes extérieures soumises au tissu. La seconde échelle traduit des phénomènes rapides de propagation d'une onde mécanique engendrée par les contraintes extérieures et se propageant le long des fils constitutifs du tissu. Le changement d'échelle dans l'espace temps résulte donc d'un changement d'échelle dans l'espace physique appelé changement d'échelle fil/tissu.

Modèle surfacique 3D:

La simulation du modèle surfacique 3D est effectuée sans contrainte sur la matière (régime libre). Elle nécessite de décomposer le tissu en surfaces élémentaires et d'utiliser la méthode des éléments finis pour simuler le modèle. Afin de vérifier la conformité des expressions traduisant la déformation du matériau, deux séries d'essais ont été mises en place. La première montre la simulation de l'évolution dynamique d'un tissu en chute libre sans obstacle. Nous testons alors l'influence des paramètres sur le comportement dynamique du tissu. La seconde fournit une représentation du tissu dans une position d'équilibre choisie. Dans ce cas, nous testons aussi l'influence des paramètres en statique. Ce type de vérification est très utilisé, car il constitue actuellement le seul moyen pour valider un modèle de tissu 3D.

I.2.3 Encadrement de Thèses, de DRT et de DEA

J'ai participé à l'encadrement de trois thèses dans le cadre de la thématique « Modélisation et simulation des structures textiles » du laboratoire GEMTEX, un DRT ((Diplôme de Recherches Technologiques) et douze DEA ((Diplôme d'Etudes Approfondies).

[Th1] Ghith Adel

Contribution à la modélisation et à la simulation du comportement dynamique des tissus textiles.

Thèse de doctorat en Automatique, début : 1^{er} octobre 1995, Université de Lille 1, ENSAIT/GEMTEX.

Bourse du ministère des affaires étrangères, coopération franco-tunisienne,

Codirection 50% (Christian VASSEUR, professeur),

Soutenue le 02 Février 1998.

Jury: Adolphe D., Pinchon D. (Rapporteurs), Castelain J.M., Rammah M., Strobbe C. (Examinateurs), Vasseur C., Bruniaux P..

Mention Très Honorable

Publications concernées :[P1][[P8]][C19][C20][C21][C22].

Ghith Adel est actuellement Maître-Assistant à l'ENIM (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir).

Résumé de la thèse :

L'objectif de cette thèse est d'apporter une contribution à l'analyse des phénomènes de comportement dynamique des tissus textiles, considérés comme des structures discontinues, anisotropes, non linéaires. La dynamique dans le sens du drapé de ce type de matériau n'a fait l'objet que d'un nombre limité de travaux de recherche relativement récents.

De nombreux outils mathématiques associés à la géométrie différentielle ont été appliqués à ce type de matériau. De même, quelques concepts de la théorie générale des modèles déformables ont été utilisés afin d'élaborer un modèle dynamique pour les tissus textiles.

La mise au point de ce modèle a tenu compte des caractéristiques mécaniques du matériau ainsi que de la spécificité de ce type de structure. Une phase d'identification et de calcul des coefficients mécaniques intervenant dans le modèle a été réalisée sur des tissus dont les paramètres de fabrication et de composition sont connus.

Des codes de calcul appliqués à la théorie des éléments finis ont été développés pour aboutir à des simulations de chute de tissus sans obstacle et au drapé de nappes de tissus posées sur un obstacle impénétrable représentant une table. Les évolutions dynamiques montrent des phénomènes transitoires caractéristiques de ce matériau.

[Th2] Legrand Xavier

Contribution à la modélisation dynamique et à l'identification de tissus techniques.

Thèse de doctorat en Automatique, début : 1er octobre 1995, Université de Lille 1, ENSAIT/GEMTEX,

Bourse régionale, partenaire région Nord-Pas de Calais,

Codirection 50% (Christian VASSEUR, professeur),

Soutenue le **21 Décembre 2000** (la préparation de thèse a été interrompue en 96/97 et 97/98 pour cause de service militaire en coopération en Tunisie),

Jury : Billoët J.L., Laurent R. (Rapporteurs), Castelain J.M., Ziakovick M. (Examinateurs), Vasseur C., Bruniaux P.

Mention « Très Honorable »

Publications concernées :[P2][P4][P5][C18][C23][C24][C25][C26][C28].

Legrand Xavier est actuellement Maître de conférences à l'ENSAIT, qualifié en 60ème section du CNU.

Résumé de la thèse :

Cette thèse vise à apporter une contribution à la modélisation des tissus techniques. Pour cela, nous proposons un modèle permettant la simulation de tissus techniques sous sollicitations diverses. Après une étude approfondie de la bibliographie, il apparaît que les travaux existants se focalisent sur la modélisation des tissus à partir de leurs seules propriétés mécaniques. Il a semblé plus intéressant de proposer un modèle utilisant les propriétés mécaniques des fils et non celles du tissu. Aussi, dans le cadre de ces travaux, il est proposé une approche basée sur le changement d'échelle fil/tissu. Cette approche nous a conduit à développer un modèle mathématique du fil en complément du modèle de tissu.

Le modèle de fil est composé de différents sous-modèles tels que celui de traction ou celui de flexion. Chacun de ces sous-modèles est explicité et mathématiquement formalisé. Pour chaque sous-modèle retenu, la méthodologie adoptée permettant l'identification de ses paramètres est présentée. Les différentes méthodologies ainsi développées mettent en œuvre des outils de l'automaticien comme le traitement d'images, les méthodes d'identification non linéaire, mais aussi utilisent des fondements propres à la mécanique par l'approche de modèles viscoélastiques.

Le modèle de tissu se décompose en deux parties. La première, dite partie géométrique, permet de simuler la fabrication du tissu. Elle conduit à définir une géométrie adaptée pour chaque fil, qu'il soit de chaîne ou de trame, à l'intérieur du tissu. La seconde partie, dite partie mécanique, permet de calculer les mouvements de l'élément de base du tissu, appelé point de croisure, induits par les sollicitations de l'ensemble de la structure tissu.

Le développement de deux logiciels de calcul et de visualisation a permis de valider les modèles sur des fils et tissus tests. Cette approche innovante répond à l'objectif fixé et autorise de nombreux développements dans le domaine de la simulation et de la C.A.O. de tissus techniques.

[Th3] Ngo Ngoc Cyril

Modélisation non linéaire et simulation des matériaux souples textiles. Application aux essais Kawabata .

Thèse de doctorat en Automatique, début : 1er décembre 1999, Université de Lille 1, ENSAIT/GEMTEX,

Bourse CIFFRE: partenaire industriel LECTRA SYSTEMES,

Codirection 50% (Jean Marie CASTELAIN, professeur),

Soutenue le 27 Janvier 2003,

Jury: Jolly D., Rachid A. (Rapporteurs), Van Langenhove L., Mesmacques G., Calonnier M., Ziakovick M., Strobbe C. (Examinateurs), Castelain J.M., Bruniaux P..

Mention « Très Honorable »

Publications concernées : [[P6]][C24][C25][C26][C30].

Résumé de la thèse :

Une étude récente annonce que près de 30% des vêtements fabriqués ont des difficultés à se vendre pour des problèmes de style ou de défauts de conception. Les entreprises de confection n'ayant pas la possibilité de fabriquer tous leurs prototypes, elles ne peuvent donc pas corriger les défauts du tombé de vêtements, visualisés par le port de celui-ci.

Différents laboratoires de recherche universitaires et industriels travaillent sur la simulation en 3 dimensions du port de vêtements, sur le mannequin virtuel. Ils souhaitent donner un outil de montage de vêtements virtuels en trois dimensions aux confectionneurs. Mais le modèle de simulation de tissu qu'ils utilisent nécessite de nombreux tests pratiques très coûteux en temps et en argent. L'objectif global de cette thèse est d'apporter un outil de simulation de tests suffisamment fiable, précis et rapide afin d'éviter la problématique précitée.

Pour cela, il est nécessaire de mettre au point un modèle de tissu qui tienne compte uniquement des données pratiques du fil afin d'avoir une base de données plus restreinte. Cela laisse sous-entendre que ce modèle doit intégrer l'armure, le type de fil, l'encombrement matière, les paramètres du tissage, etc., ce qui nous amène à considérer le tissu textile comme un assemblage de fils.

Contrairement au modèle de tissu technique, il est impératif de développer de manière plus approfondie l'interactivité entre les fils de chaîne et de trame au point de croisure. Aussi, il est nécessaire de développer un modèle de fil devant tenir compte d'un protocole de mesure des propriétés du fil. Ce protocole doit donner accès :

- > aux caractéristiques rhéologiques (frottement sec),
- aux caractéristiques mécaniques telles que traction, flexion et torsion (quasistatiques),
- > aux caractéristiques dynamiques.

Une fois le modèle de fil défini complètement, avec ses paramètres, nous injecterons ces derniers dans le modèle affiné du tissu. La validation de celui-ci s'effectuera par les tests de caractérisation fine de la chaîne de Kawabata. Cette chaîne modulaire de caractérisation physique et mécanique KESF (Kawabata Evaluation System for Fabrics) est constituée d'un ensemble d'appareils de mesures. Ils ont pour but de mener des études objectives quant au comportement mécanique de toutes les matières textiles. Le KESF, d'une importance majeure dans la mise au point de produits de substitution, est composé de 4 tests :

➤ KES-FB1de traction et de cisaillement,

- > KES-FB2 de flexion,
- ➤ KES-FB3 de compression,
- > KES-FB4 de caractérisation de la surface.

Seuls les tests KES-FB1 et KES-FB2 seront simulés car ils fournissent les paramètres mécaniques nécessaires à la conception de la base de données du modèle de drapé. La simulation de ces tests et leur comparaison avec ceux obtenus en pratique sur la chaîne de Kawabata permettra, entre autres, de valider aussi ce modèle affiné.

[DRT1] Riancho Nils

Conception d'un prototype de découpe de tissus par technologie Ultrason.

Diplôme de Recherches Technologiques début : 1er mars 2000, Université de Valenciennes,

Bourse Industrielle, partenaire industriel H₂₀,

Codirection 33% (Koncar V., Castelain J.M.),

Soutenue le 5 Novembre 2003.

Confidentiel

Résumé du DRT:

L'objectif de cette étude est de réaliser une machine automatique réalisant les opérations suivantes :

- insertion du tissu microfibre présenté sous forme de rouleaux,
- découpe automatique des patrons (serviettes) par la technique à ultrasons (utilisation d'une sonotrode spéciale permettant de broder des motifs),
- > pose d'étiquettes,
- > emballage automatisé.

Une étude de marché sur le produit a été effectuée, afin de connaître les besoins de celui-ci et de définir le débit de la machine. La conception, la mise en œuvre des différents asservissements, la coordination de chaque sous systèmes et la réalisation pratique (soustraitance) représente les différentes étapes du projet. Une étude de l'intégration de cette machine dans une chaîne complète de fabrication a aussi été étudiée.

[DRT2] Daada Nade

Modification d'une machine de confection de change bébé en vue de modifier le design et les fonctionnalités de celui-ci.

Diplôme de Recherches Technologiques début : 1er septembre 2002, Université de Valenciennes,

Bourse Industrielle, partenaire industriel CPID,

Codirection 33% (P.Vroman, Castelain J.M.),

Soutenance prévue fin 2003,

Confidentiel.

Résumé du DRT:

L'objectif de cette étude est de greffer sur une machine de confection de changer bébé un processus capable de respecter le cahier des charges des nouveaux changes. Ce projet comporte deux étapes.

La première consiste à définir un complexe élastique qui permette à la fois de reproduire la forme des changes en vente sur le marché à l'heure actuel, mais également de permettre à l'enfant de mieux se mouvoir. Les contraintes imposées étant surtout de ne pas reproduire les produits vendus par la concurrence (Procter et Kimberly), c'est à dire créer, ne pas plagier ces marques et ne pas tomber dans leurs brevets. L'idée consiste à former un panneau mono laize et à venir rajouter deux panneaux élastiques de forme rectangulaire. Ce modèle, d'un point théorique remplit toutes les fonctions d'une couche.

La seconde étape finalise le projet par la conception d'une machine capable :

- > de stocker le complexe élastique rapporté,
- > de le découper à la forme souhaitée avec la moindre perte matière,
- ➤ de l'assembler sur le panneau mono laize par technique ultrason avec motif.

Cette étape se traduit par une phase de conception sur ordinateur (DAO), du suivi de la fabrication et de la validation de l'étude.

[DEA1] Kollar G.,

Simulation d'une conduite de teinture.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 50% (Vasseur C.), (1992).

[DEA2] Rabedaoro C.,

Commande de moteur pas à pas avec sûreté de fonctionnement. Robustesse de la commande.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 50% (Vasseur C.), (1993).

[DEA3] Duforest D.,

Identification en temps réel d'un système mécanique. Comparaison avec les méthodes existantes.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 50% (Vasseur C.), (1993).

[DEA4] Bertaux D.,

Commande robuste des systèmes non linéaires – Application à un moteur pas à pas.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 30% (Koncar V., Vasseur C.), (1994).

[DEA5] Castex A.,

Identification en temps réel des systèmes non linéaires.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 50% (Vasseur C.), (1994).

[DEA6] Ghith A.,

Modélisation et simulation du comportement dynamique d'un fil à longueurs de fibres variables.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 30% (Koncar V., Vasseur C.), (1995).

[DEA7] Legrand X.,

Commande prédictive par la programmation non linéaire et application aux systèmes non linéaires.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 30% (Koncar V., Vasseur C.), (1995).

[DEA8] Bouvier L.,

Simulation des mesures des saturations colorimétriques – Application à la teinture.

D.E.A. Instrumentation et Analyses Avancées, EUDIL (Ecole Universitaire Des Ingénieurs de Lille), GEMTEX/ENSAIT,

Codirection 30% (Koncar V., Vasseur C.), (1996).

[DEA9] Ngo-Ngoc C.,

Etude des méthodes de gradation en vue d'automatiser ce concept.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 50% (Vasseur C.), (1999).

[DEA10] Kacem I.,

Contribution à la modélisation de tissus enduits.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 50% (Castelain J.M.), (2000).

[DEA11] Casiez G.,

Modélisation et simulation du comportement dynamique d'un fil en flexion.

D.E.A. Instrumentation et Analyses Avancées, EUDIL, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 50% (Castelain J.M.), (2001).

[DEA12] Cartier S.,

Modélisation et simulation du comportement dynamique d'un fil en traction.

D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle, Université de Lille, GEMTEX/ENSAIT, Codirection 50% (Castelain J.M.), (2001).

I.2.4 Bilan synthétique de la production scientifique

La liste complète des publications et des communications est présentée dans la section suivante. Le tableau ci dessous donnent un bilan global des trois thématiques précédemment décrites.

Thème	Bilan
Modélisation	5 Revues internationales, 11 Conférences internationales avec comité de lecture et actes.
Identification	3 Revues internationales, 3 Conférences internationales avec comité de lecture et actes.
Simulation et Commande	14 Conférences internationales avec comité de lecture et actes.

I.2.5 Production scientifique (36 références)

[Thèse]: Bruniaux P.,

Contribution à la modélisation non linéaire, à l'identification et à la commande en boucle ouverte des moteurs pas à pas.

Thèse de docteur de 3^{ème} cycle, **19 décembre 1988**, Université des Sciences et Technologies de Lille,

Jury: Vidal P. (Président), Povy L. (Rapporteur), Goeldel C., Laurent R., Pinchon D. (Examinateurs), Vittu M., Mauger D. (Invités).

Mention « Très Honorable »

Directeur de Thèse : Povy L., professeur.

Liste des publications dans des revues internationales (8 références)

[P1] Ghith A., Bruniaux P., Koncar V. & Vasseur C.,

Modeling and simulation of a falling yarn with one end fixed.

Textile Research Journal, Vol. 67, N°5, pp 321-324, (**1997**).

[P2] Koncar V., Koubaa M.A., Legrand X., Bruniaux P. & Vasseur C.,

Multirate predictive control with nonlinear optimization. Application to a thermal process for batch dyeing

Textile Research Journal, Vol. 67, N°11, pp 788-792, (1997).

[P3] Bruniaux P. & Vasseur C.,

Modeling and identifying the parameters of a fabric drape model.

Textile Research Journal, Vol. 71, N°4, pp 336-342, (2001).

[P4] Legrand X., Bruniaux P. & Vasseur C.,

Modeling and studying yarn dynamic behavior.

Textile Research Journal, Vol. 71, N°10, pp 890-897, (**2001**).

[P5] Legrand X., Bruniaux P. & Castelain J.M.,

Image processing in varn elastic bending coefficient identification.

Journal of Advanced Materials, Vol. 34, N°4, pp 26-33, (2002).

[P6] Ngo Ngoc C., Bruniaux P. & Castelain J.M.,

Constrained dynamic yarn modeling.

Textile Research Journal, Vol. 72, N°11, pp 1002-1008, (2002).

[P7] Bruniaux P., Legrand X. & Vasseur C.,

Yarn and fabric model inter-connected.

Journal of Advanced Materials, (accepté en 2003)...

[P8] Bruniaux P., Ghith A. & Vasseur C.,

Modelling and parametric study of fabric drape.

Advances in Complex Systems, (accepté en 2003).

Liste des communications nationales et internationales avec comité de lecture et actes (30 références):

[C1] Bruniaux P., Evrard P., Pinchon D. & Mauger D.,

Banc d'essais pour moteur pas à pas entraînant une charge variable lors d'un positionnement. $6^{\grave{e}me}$ Colloque International sur les moteurs pas à pas, E.P.F.Lausanne, Suisse, 04-05 Juillet, (1990).

[C2] Bruniaux P. & Pinchon D.,

Etude d'un mouvement incrémental réalisé par un moteur pas à pas. Influence du modèle mathématique choisi.

A.M.S.E., International'91 Djerba Conference on Signal, Data, Systems with emphasis on Electrical & Electronics Engineering, Djerba, Tunisie, 11-13 Novembre, (1991).

[C3] Bruniaux P. & Pinchon D.,

Commande optimale d'un moteur pas à pas. Sûreté de fonctionnement.

A.M.S.E.-I.C.E.A'92, First International Conference on Electronics and Automatic Control, Tizi Ouzou, Algérie, 13-15 Mai, (1992).

[C4] Bruniaux P. & Pinchon D.,

Utilisation de la caractéristique dynamique pour améliorer la commande d'un moteur pas à pas en boucle ouverte.

7^{ème} Colloque International sur les moteurs pas à pas, Nancy, France, 1-3 Juillet, (1992).

[C5] Bruniaux P., Koncar V. & Pinchon D.,

Optimal control of stepper motor with definition of safety factor.

I.F.A.C.-I.M.A.C.S.-I.E.E.E.-I.U.T.A.M, Workshop on Motion Control for Intelligent Automation, Pérouse, Italie, 27-29 October, (1992).

[C6] Koncar V., Bruniaux P. & Vasseur C.,

Large scale discrete system control – adaptative coordination method.

I.E.E.E. /S.M.C.'93, International Conference on Systems Man and Cybernetics, Le Touquet, France, 03-06 Octobre, (1993).

[C7] Pinchon D. & Bruniaux P.,

Identification des paramètres d'un système électromécanique non linéaire. Influence du modèle d'étude.

I.M.A.C.S-T.C.1'93, 4th International Conference on Computational Aspects of Electromechanical Energy Converters and drives, Montreal, Canada, (1993).

[C8] Bruniaux P., Koncar V. & Pinchon D.,

Non linear system identification by decomposition in subsystems.

ESM'94, S.C.S., European Simulation Multiconference, Barcelone, Espagne, 01-03 Juin, (1994).

[C9] Pinchon D., Bruniaux P. & Koncar V.,

Speed tracking control for a stepper motor.

I.E.E.E., Second Mediterranean Symposium on New Directions in Control & Automation, Crète, Grèce, 19-22 Juin, (1994).

[C10] Bruniaux P., Koncar V., Pinchon D. & Bertaux D.,

Non linear system robust control. Application on a stepping motor.

I.E.E.E., *Third International Conference on Control Applications*, University of Strathclyde, Glasgow, Ecosse, 24-26 Août, (1994).

[C11] Koncar V., Bruniaux P. & Vasseur C.,

Large scale system control, Pole assignment by non linear programming.

I.C.S.E. '94, *International Conference on System Engineering*, Coventry, Grande Bretagne, 06-08 Septembre, (1994).

[C12] Koncar V., Vasseur C., Bruniaux P. & Pinchon D.,

Multirate predictive control with multiple reference model. Application on thermic process.

I.F.A.C., Conference on System Structure and Control, Nantes, France, 5-7 Juillet, (1995).

[C13] Pinchon D., Hentabli K., Koncar V. & Bruniaux P.,

Robust behaviour of a system controlled by the general predictive control method. Application on a thermic process.

2ème International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, Pologne, 30 Aout-2 Septembre, (1995).

[C14] Koncar V., Bruniaux P., Koubaa M.A. & Vasseur C.,

Robust setting of the predictive control parameters.

2ème Congrès Maghrébin de Génie Electrique, Tunis, Tunisie, 16-17 Septembre, (1995).

[C15] Pinchon D., Bruniaux P. & Koncar V.,

A new approach to the non linear system robust control, Application on an incremental motion.

I.F.A.C., Workshop Motion control, Munich, Allemagne, 9-11 Octobre, (1995).

[C16] Pinchon D., Bruniaux P., Koncar V. & Mauger D.,

Etude de la faisabilité de l'identification en temps réel d'un actionneur à moteur pas à pas.

Congrès International de génie industriel de Montréal sur la productivité dans un monde sans frontières, Montréal (Québec), Canada, 18-20 Octobre, (1995).

[C17] Koubaa M.A., Koncar V., Bruniaux P. & Vasseur C.,

Predictive control with auto-adjustable parameters.

I.E.E.E./S.M.C., C.E.S.A'96 I.M.A.C.S., International Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, Lille, France, 9-12 Juillet, (1996).

[C18] Koncar V., Koubaa M.A., Legrand X., Bruniaux P. & Vasseur C.,

Predictive control with non linear optimization. Application to a thermal process.

I.C.S.E'96, 11th International Conference on Systems Engineering, Las Vegas, U.S.A., 9-11 Juillet, (1996).

[C19] Ghith A., Bruniaux P., Koncar V. & Vasseur C.,

Modeling and simulation of a yarn dynamics.

I.E.E.E./S.M.C., C.E.S.A'96 I.M.A.C.S., International Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, Lille, France, 9-12 Juillet, (1996).

[C20] Ghith A., Bruniaux P. & Vasseur C.,

Modélisation du drapé d'un tissu – Application au secteur textile /habillement.

Colloque International de l'I.T.A.A., Confluences fashioning intercultural perspectives, Lyon, France, 10-12 Juillet, (1997).

[C21] Ghith A., Bruniaux P. & Vasseur C.,

Modeling fabric dynamics.

XIth Romanian Conference of Textiles and Leathership, Iasi, Roumanie, 23-24 Octobre, (1997).

[C22] Ghith A., Bruniaux P. & Vasseur C.,

Deformable model Theory applied to fabrics.

IEEE-IMACS, CESA'98, April, Nabeul-Hammamet, Tunisie, 1-4 Avril, (1998).

[C23] Legrand X., Bruniaux P. & Vasseur C.,

A new approach for modeling woven fabrics.

WAC'2000, Fourth Biannual World Automation Congress, Wailea, Maui, Hawaii, U.S.A, 11-16 Juin, (2000).

[C24] Legrand X., Bruniaux P. & Ngo Ngoc C.,

Modeling and Study of the Dynamical Behavior of a Yarn.

16th IMACS World Congress 2000, Lausanne, Suisse, 21-25 Août, (2000).

[C25] Legrand X., Bruniaux P. & Ngo Ngoc C.,

Technical fabric modeling by yarn/fabric scale swap.

6th Asian Textile Conference (ATC6), Hong Kong, Chine, 22-24 Août, (2001).

[C26] Legrand X., Bruniaux P. & Castelain J.M.,

Fabric modeling: convergence calculus optimisation.

ESS2002, 14th European Simulation Symposium and Exhibition, Dresden, Allemagne, 23-26 October, (2002).

[C27] Ngo Ngoc C., Bruniaux P. & Castelain J.M.,

Modeling friction for varn fabric simulation, Application to bending hysteresis.

ESS2002, 14th European Simulation Symposium and Exhibition, Dresden, Allemagne, 23-26 October, (2002).

[C28] Serwatka A. & Bruniaux P.,

Modelling of the stress-strain curve of textile products

3rd World Textile Conferences on Textile Education and Research: Evolution or Revolution, Lodz, Poland, 27 June, (2003).

[C29] Bruniaux P. & Castelain J.M.,

Traction model - A methodological approach

ISC'2003 Conference Workshops on Modelling and Simulation in the Textile Industry, Valencia, Spain, 9-12 June, (2003).

Conférence plénière

[C30] Bruniaux P., Legrand X., Ngo Ngoc C. & Castelain J.M.,

Modélisation mésoscopique du tissu par le fil.

XIIth Romanian Conference of Textiles and Leathership, Iasi, Roumanie, 17-19 Octobre, (2002).

I.2.6 Participation à l'activité de la communauté scientifique

Mes activités scientifiques m'ont amené à participer à différents groupes de travail régionaux et nationaux. Depuis 1998, je participe au Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Hommes-Machines (GRAISyHM). Je participe également aux journées Synergie, ce qui me permet de valider les aspects mécaniques de mes travaux. Cet échange entre automaticiens et mécaniciens permet des confrontations très fructueuses d'un point de vue méthodologique et/ou technique.

Sur le plan international, j'ai participé à l'organisation du congrès international ESSE'2003, SCS à Valencia (Espagne) en tant que Chairman de la session « Simulation in Textile Industrie ». De même, j'ai été sollicité en tant que rapporteur du PhD in Engineering de Mr John Githaiga intitulé: « Study of the dynamic behavior of the weft yarn at the end of the weft insertion process in air-jet weaving ».

I.2.7 Participation à la valorisation

Dans le cadre de la valorisation, différentes études ont été menées avec l'objectif d'équilibrer mes activités de recherche théorique et mes activités industrielles. Pour cela, j'ai participé à la négociation de nombreux contrats industriels ainsi qu'à leur gestion. Ces contrats m'ont également permis de dégager des fonds pour financer mes travaux théoriques. Par ailleurs, certaines études industrielles m'ont donné l'occasion de mettre en oeuvre mes travaux théoriques dans un cadre industriel, validant ainsi certaines hypothèses émises. Le caractère confidentiel de ces travaux ne permet pas de les publier dans des revues scientifiques ou dans le cadre de congrès. Une synthèse de cette activité avec financement est présentée ci-dessous :

Année	Sujet	Industrie/Organisme	Montant du contrat K€нт
1998	Découpe de tissus par ultrasons	Contrat Plan Etat Région - Datar	53.8
1999	Machine de découpe par ultrasons	Société H ₂₀ , Givenchy	6.6
1999	Mise en exploitation d'un système informatique pour la fabrication de peignoirs	Société Descamps, Moislains	4.6
1999- 2002	Modélisation et simulation des essais mécaniques de la chaîne de KAWABATA	Société Lectra Systèmes	48.7
2001	Etude de l'influence des paramètres textiles sur la mécanique des tissus de verre enduits et sur l'enroulement sur mécanisme pour store	Société Hexcel Fabrics	6.1
Total			119.8

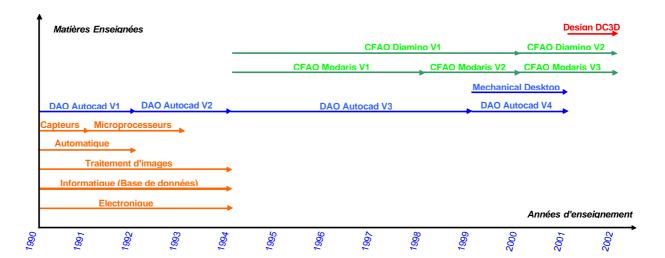
I.2.8 Collaborations scientifiques

Les différentes collaborations scientifiques entreprises aux niveaux national et international sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Domaine	Etablissement	Contacts
Laboratoire de confection	Lectra Systèmes (Bordeaux)	Strobbe C.
(industrie)	Hexcel Fabrics (Lyon)	Forin R.
T 1 (12 A ()	Laboratoire d'Automatique et Mécanique Appliquée (ESEM d'Orléans)	Pr. Laurent R.
Laboratoire d'Automatique	Laboratoire I3D, CNRS (Université de Lille 1)	Pr. Vasseur C.
	Centre de Robotique, d'Electrotechnique et d'Automatique (Université de Picardie)	Pr. Pinchon D.
Laboratoire d'Informatique	Laboratoire Informatique Fondamentale de Lille, CNRS (Université de Lille 1)	Pr. Boulet P.
Laboratoire de Mécanique	Laboratoire de Modélisation des Systèmes et Procédés (ENSAM de Paris)	Pr. Billoët J.L.
	Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, (ENSITM de Mulhouse)	Pr. Adolphe D.
	Centre Technologique du Textile, (ENIM Monastir, Tunisie)	Ghith A.
Laboratoire de Mécanique Textile	Institut Polytechnique IASI (Roumanie)	Pr. Avram D.
Textile	Université de Technologie et de Design de Saint Petersbourg (Russie)	Rasdomakhin N., Pr. Basuev A.
	Fachhochschule Niederrhein Mönchengladbach (Allemagne)	Pr. Firsterbusch D.
	Université de Lodz (Pologne)	Pr. Frydrych J.

I.3. ACTIVITES PEDAGOGIQUES

Cette section retrace ma carrière d'enseignant depuis mon intégration à l'ENSAIT en 1990. Le graphique ci-après décrit les principaux domaines, où je suis intervenu, tous types d'enseignement confondus (Cours, TD, TP):



Les premières années à l'ENSAIT m'ont permis de mettre à profit mes connaissances en EEA (Electronique, Electrotechnique, Automatique), qui correspondent à ma formation de base. Ensuite, compte tenu des nécessités de service et du profil de mon poste, j'ai été amené à orienter progressivement mon enseignement vers le domaine de la CAO/DAO.

Mes premières actions m'ont conduit à créer une cellule de CAO/DAO en mécanique. Pour cela, dès 1991, j'ai effectué une étude du marché des différents logiciels et matériels existants afin d'optimiser le savoir faire à transmettre aux étudiants en fonction des moyens financiers mis à ma disposition. Les évolutions constantes de l'informatique et les nouvelles approches des logiciels de DAO Mécanique (Autocad et Mechanical Desktop) m'ont amené à mettre à jour (voire à remplacer) régulièrement les logiciels utilisés (versions marquée v1, v2, v3, v4 dans le tableau ci-dessus), ainsi que le parc informatique. De nombreux documents pédagogiques destinés à transmettre des méthodes de conception en CAO ont été rédigés et remis à jour régulièrement.

En 1994, il m'a été demandé de programmer sur 5 ans un important investissement pédagogique visant à mettre en place une cellule flexible de confection à l'ENSAIT permettant de développer un enseignement technologique de haut niveau. Cet enseignement avait disparu depuis plusieurs années dans les programmes de l'ENSAIT, ce qui était regrettable car la confection demeure une activité fondamentale de la chaîne de fabrication dans le secteur textile. N'ayant a priori aucune formation dans ce domaine technologique très spécifique, j'ai entrepris un travail bibliographique très approfondi sur ce métier. Par ailleurs, en contact avec différents partenaires industriels, j'ai mis en place de toute pièce la cellule de CAO/CFAO confection présentée en Figure I-3, ainsi que les enseignements associés. Utilisant uniquement des logiciels industriels, cette cellule permet la création des patronages et des vêtements (Modaris), la mise en place des lois de gradation ainsi que l'optimisation du placement des pièces manuellement et/ou automatiquement (Diamino). En amont, l'interactivité avec l'utilisateur est assurée par des tables à digitaliser pour numériser les patrons sous forme de cartons ou de tissus. En aval, un traceur et un découpeur permettent de produire le patronage papier ou tissu des vêtements en fonction des placements « mère ». Enfin, un atelier de couture permet aux élèves ingénieurs de finaliser la création des vêtements par leur montage. Cet ensemble forme une chaîne de fabrication complète telle qu'on la trouve dans les structures industrielles.



Figure I-3: Cellule de confection

Dans le cadre de la mise en place de cette cellule, j'ai établi un partenariat très étroit avec la société LECTRA SYSTEMES, leader mondial dans le domaine, qui a fourni l'essentiel du matériel. Ce partenariat s'est prolongé ensuite par la signature d'un contrat selon lequel l'ENSAIT effectue des actions de formation continue dans les entreprises pour le compte de LECTRA SYSTEMES. Une des contrepartie est que mon laboratoire de confection bénéficie gratuitement depuis 3 ans des évolutions logicielles et de la maintenance sur site (valeur annuelle : 7.7k€), ainsi que de certains avantages sur les achats de nouveaux logiciels et matériels.

La rédaction de nombreux documents électroniques a complété la mise en place pédagogique : Cours, TD (présentations sur ordinateur avec animations et vidéos industrielles intégrées) et TP (polycopiés avec orientation métier). Actuellement, je rédige un manuel dont la diffusion sera assurée auprès de l'ensemble des clients français de LECTRA SYSTEMES. L'objectif de ce document est de présenter une méthodologie de conception 3D sur le nouveau logiciel «Design Concept 3D »,qui est structuré en fonction des secteurs d'activité visés (ameublement, automobile, etc.), tels que présentés ci-dessous (cf. § I.3.2.3.).

I.3.1 Formation initiale

En octobre 1990, date de ma nomination comme maître de conférences à l'ENSAIT, j'ai créé de nombreux enseignements, dont certains m'ont permis d'élargir mes connaissances sur :

- les bases de données,
- les capteurs industriels,
- les structures matérielles des microprocesseurs,
- > la DAO mécanique,
- ➤ la CFAO confection.

Les différents enseignements effectués à l'ENSAIT (sauf cas contraire et précisé) se résument de la façon suivante :

I.3.1.1 Cours magistraux

En Génie Electrique:

Electronique basse fréquence (1ère année, 12 heures),

> Capteurs industriels (1^{ère} année, 8 heures).

En Génie Informatique:

- ➤ Informatique base de données (3^{ème} année, 10 heures),
- > Traitement d'images (3^{ème} année, 8 heures).

En Génie Mécanique:

Dessin Assisté par Ordinateur (1^{ère} année, 2 heures).

En Textile:

- ➤ Industrie de la confection et du textile/habillement (1 ère année, 12 heures),
- ➤ Industrie de la confection et du textile/habillement (2ère année apprentissage, 12 heures),
- > CFAO de tissus techniques (3^{ème} année, 4 heures).

I.3.1.2 Travaux Dirigés

En Génie Electrique:

- ➤ Electronique basse fréquence (1ère année, 8 heures),
- ➤ Calculateurs et processus industriels (2^{ème} année, 16 heures).

En Textile:

- Méthodologie de la confection de vêtements (1ère année, 10 heures),
- Méthodologie de confection de vêtements (1^{ère} année apprentissage, 10 heures).

I.3.1.3 Travaux Pratiques

En Génie Electrique:

- Logique combinatoire et séquentielle (1^{ère} année, 16 heures), IUT de biologie,
- ➤ Automatique Systèmes linéaires (2ème année, 12 heures).

En Génie Informatique:

- ➤ Informatique base de données (3^{ème} année, 8 heures),
- ➤ DAO mécanique en 2D et 3D (1^{ère} année, 16 heures, 2^{ème} année, 16 heures),

En Textile:

- ➤ CAO/CFAO Lectra Systèmes niveau 2 (1ère année, 16 heures),
- > CAO/CFAO Lectra Systèmes niveau 1 (1^{ère} année apprentissage, 12 heures),
- ➤ CAO/CFAO Lectra Systèmes niveau 2 (2ère année apprentissage, 12 heures).

Ces différents enseignements couvrent la période allant de 1989 à 2002. Certains ont été conçus uniquement pour une année, compte tenu des nécessités du service et de l'évolution constante des programmes pédagogiques de l'ENSAIT. Lors de mes premières années à l'ENSAIT mon volume annuel d'enseignement s'est établi, en moyenne, à 1,5 fois ma charge statutaire. Depuis 4 ans, je dépasse peu cette charge, ce qui me permet d'enseigner en industrie sans négliger mes activités de recherche et d'encadrement.

I.3.1.4 Encadrement de mémoires de fin d'études (dernière année)

Les premiers mémoires de fin d'études ingénieur encadrés à l'ENSAIT ont porté sur le thème « Identification et Commande des Actionneurs Incrémentaux » correspondant à mes travaux de recherche de cette époque :

Vroman P. & Coisne J.D.,

Simulation de l'effet de charge inertielle d'un bras de robot commandé par microcontrôleur 80196.

Socitec, Codirection 50%, (1992).

Duforest D.,

Identification en temps réel d'un système mécanique. Comparaison avec les méthodes existantes.

Socitec, Codirection 50%, (DEA 1993).

Rabedaoro C.,

Commande de moteur pas à pas avec sûreté de fonctionnement. Robustesse de la commande.

Socitec, Codirection 50%, (DEA 1993).

Arcade J.B. & Durivaud X.,

Simulation d'un bras de robot sur banc d'essais

Ensait, Codirection 50%, (1993).

Jouini M.,

Simulation d'un système non linéaire par le logiciel MATRIX – Commande adaptative.

Ensait, Codirection 50%, (1993).

Bertaux D.,

Commande robuste des systèmes non linéaires – Application à un moteur pas à pas.

Socitec, Codirection 50%, (DEA 1994).

Castex A.,

Identification en temps réel des systèmes non linéaires.

Ensait, Codirection 50%, (DEA 1994).

Sorho D.,

Asservissement en position.

Ensait, Codirection 50%, (1994).

Legrand X.,

Commande prédictive par la programmation non linéaire et application aux systèmes non linéaires.

Ensait, Codirection 50%, (DEA 1995).

A partir de 1995, la mise en place du nouveau thème de recherche « Modélisation et simulation du comportement dynamique des structures textiles » a progressé fortement. Ceci s'est traduit par l'encadrement d'élèves ingénieurs de 3^{ème} année en plus des DEA. Les travaux décrits ci-dessous ont aidé à défricher ce nouveau thème, tant d'un point de vue scientifique qu'industriel :

Ghith A.,

Modélisation et simulation du comportement dynamique d'un fil à longueurs de fibres variables.

Ensait, Codirection 50%, (DEA 1995).

Delobelle L.,

Identification des paramètres du modèle mathématique d'un fil.

Ensait, Codirection 50%, (1996).

Maslowski J.,

Influence des caractéristiques du tissu sur ses propriétés mécaniques.

Ensait, Codirection 50%, (1997).

Blinova S. & Gordienko K.,

Simulation des tissus par la méthode des éléments finis.

Université de Technologie et de Design de Saint Petersbourg (Russie), Codirection 50%, (1998).

Anouma L.,

Modélisation de l'enroulement des stores.

Ensait, Codirection 50%, (1999).

Arnone G.,

Analyse et caractérisation des tissus et des fils.

M.S.T. Mesures et Contrôle de Lille 1, Codirection 50%, (1999).

Kacem I.,

Contribution à la modélisation de tissus enduits.

Ensait, Codirection 50%, (2000).

Barrére A.,

Etude de l'influence des paramètres textiles sur la mécanique des tissus de verre enduits et sur l'enroulement sur mécanisme pour store.

Hexcel Fabrics, Codirection 50%, (2001).

Casiez G.,

Modélisation et simulation du comportement dynamique d'un fil en flexion

Ensait, Codirection 50%, (DEA 2001).

Cartier S.,

Modélisation et simulation du comportement dynamique d'un fil en traction.

Ensait, Codirection 50%, (DEA 2001).

Serwatka A.,

Caractérisation des paramètres du tissu par la chaîne de KAWABATA.

Université de Lodz (Pologne), Codirection 50%, (DEA 2001).

Enfin, pour assurer l'évolution du laboratoire de confection et pour ouvrir de nouvelles pistes de recherche dans cette discipline, j'ai encadré en parallèle les mémoires industriels et le DEA suivants :

Ducret S. & Eynard L.,

Adaptation d'une machine à commande numérique pour le perçage des douves.

Dewilde, Codirection 50%, (1996).

Yam T..

Technique d'assemblage de textiles.

Bertrand Faure, Codirection 100%, (1998).

Saint Martin L.,

Découpe de tissus par ultrasons.

M.S.T. Mesures et Contrôle de Lille 1, Codirection 100%, (1998).

Benamor S.,

Mise en exploitation d'un système informatique pour la fabrication de peignoir.

Descamps, Codirection 100%, (1999).

Haberschill L.,

Intégration d'une documentation métier sur le logiciel Modaris.

Lectra Systèmes, Codirection 100%, (1999).

Ngo Ngoc C.,

Etude des méthodes de gradation en vue d'automatiser ce concept.

Lectra Systèmes, Codirection 100%, (DEA 1999).

Herold N.,

Gradation automatique de vêtements.

Fachhochschule Mönchengladbach (Allemagne), Codirection 50%, (2000).

Riancho N.,

Machine découpe par ultrason.

H20, Codirection 50%, (2000).

I.3.2 Formation Continue

La diffusion des connaissances au titre de la formation continue étant une des missions de l'ENSAIT, je m'y suis impliqué dès 1997. Ma charge administrative ne me le permettait pas jusqu'à cette date.

I.3.2.1 Mission régionale

En 1992, l'ENSAIT a été sollicité par le Conservatoire National des Arts et Métiers (C.N.A.M.) pour former du personnel de la Communauté Urbaine de Lille (C.U.D.L.) dans le domaine du génie électrique. Les cours de niveau CAP et BEP que j'ai dispensé sont :

- > 20 heures de cours de microprocesseurs.
- ➤ 20 heures de cours d'électronique.

I.3.2.2 Missions étrangères

Pendant la période 1997-1999, il m'a été confié différentes missions en TUNISIE dans le cadre de la rénovation des enseignements textiles à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de MONASTIR (E.N.I.M.). J'ai donc enseigné :

- > 8 heures de cours de confection (1997/98),
- ➤ 12 heures de Cours et 12 heures de Travaux Pratiques en confection (1998/99).

I.3.2.3 Missions industrielles

La formation continue intra-entreprise constitue une branche d'activité qui s'est fortement développée à partir de l'année 1999. Le passage à l'an 2000 s'est traduit par un accroissement important des demandes de formation sur les nouveaux logiciels de C.F.A.O.. Les contacts que j'avais établis avec la société LECTRA SYSTEMES m'ont permis de mettre en place un partenariat de formation avec cette société (Groupe International et leader mondial de la CFAO textile-habillement). Une forte demande dans le domaine du textile/habillement a émergé lors des premières formations. Ensuite, une reconversion s'est opérée vers le secteur des Textiles à usage Technique (TuT).

Formation textile/habillement (1999-2000):

Plusieurs formations ont été effectuées au sein de nombreuses entreprises, ainsi que dans les différentes « écoles LECTRA » implantée à PARIS, LYON et CHOLET. Le tableau ci après fait apparaître le nom des logiciels enseignés, afin de montrer la diversité des actions menées : Modaris (conception de patronages, de vêtements), Grader (mise en place d'une gradation sur un vêtement), Styler (logiciel expert pour le patronage).

Formation	Nom de la Société (lieu)	Secteur d'activité	Nombre de jours
	DESCAMPS (Moislains)	Linge de maison	5
	LECTRA SYSTEMES (Paris)		14
	LECTRA SYSTEMES (Cholet)	Confection	3
Modaris	LECTRA SYSTEMES (Lyon)		4
	FRANCE LIGNE (Bordeaux)	Maillot de bain (femme)	4
	SOCAMI (Nantes)	Vêtement homme	6
	PR3 Central Coupe (Bourges)	v etement nomine	4
	ESCAPE (Cambrai)	Vêtement femme	6
Styler et Grader	BRAGARD (Colmar)	Vêtement de travail (hôtel)	4
Grader	INFOLINE (Paris)	Le sentier	1

Montant des contrats : 20692 €HT

Formations Textiles à usage Technique (2000-2002):

Dans ce cadre, la société LECTRA SYSTEMES a souhaité rediriger mes interventions vers des secteurs autres que l'habillement. En effet, mon expérience professionnelle (10 ans) sur les logiciels de CAO tels que Autocad et Mechanical Desktop répondait à ses besoins, dans la mesure où elle recherchait un formateur alliant ce type d'expérience avec une bonne perception des textiles techniques (domaine de recherche). Le tableau ci après résume l'ensemble des formations sur les logiciels TopConsult (conversion d'un dessin en pièce à découper), DiaminoI (placement de pièces) , Topdraft (CAO de pièces en 2D), TopsolidV6 DC2D (CAO en 2D), TopsolidV6 DC3D (CAO en 3D). Cette activité a permis un enrichissement personnel important du fait de la diversité des secteurs d'activité concernés :

- > camping (tentes, auvent de caravane,...)
- ballons gonflables (montgolfière)
- bateaux (coques, voiles, habitacle ...)
- > structures tendues (chapiteaux)
- > structures gonflables (vessie d'eau ou d'essence à usage militaire)
- > ameublement (fauteuil de style, fauteuil médical)
- automobile (siège, habitacle,...)
- aérospatiale (carlingue, moteur, étanchéité, etc.)

Formation	Nom de la Société (lieu)	Secteur d'activité	Nombre de jours
TopDraft	Hispano Suiza (Rouen)	Aerostructure	4
Торыш	Aérazur (Rouen)	Airbag	4
	Aérazur (Rouen)	Alloag	5
	Ditechna (Dunkerque)	Structure gonflable	3
TopDraft, DiaminoI	Manutex (St Nazaire)	Aérospatiale	0,5
	Manutex (Nantes)		4
	Prost Grand Prix (Paris)	Voiture de course	4
Topdraft, Topconsult	Bretagne composite (Savenay)	Bateau	3
TopConsult	Composite Industrie (Evry)	Composite	2
TopConsult, DiaminoI	Socata (Tarbes)	Aérospatiale	4
	Formateur LECTRA (Paris)	Formateur	5
	Sékurit (Compiègne)	Pare-brise	2
TopConsult, DiaminoI, Vigiprint	Raclet (Le Mans)	Camping	2
TopcadV6 DC2D, DiaminoI	Sefar-filtis (Lille)	Filtration Indus.	5

FAO, DiaminoI	Faster, Paris Dakar (Paris)	4x4	3
TopcadV6 DC2D, TopConsult, DiaminoI, Vigiprint	CIAT (Le mans)	Camping	4
TopcadV6 DC3D	Atelier du Ludes (Le Ludes)	Ameublement	3

Montant des contrats : 32666 €IT

La formation continue me permet de financer partiellement ma recherche et le laboratoire de confection de l'école. Elle permet également d'établir un lien très solide avec le monde industriel, utilisateur potentiel des modèles de tissus issus de ma recherche.

I.4. RESPONSABILITES COLLECTIVES

En complément de mes activités de recherche et d'enseignement, je me suis fortement investi à l'ENSAIT sur le plan des responsabilités collectives. Dans ce sens, trois volets sont à considérer. Le premier concerne les activités liées à l'organisation pédagogique de l'école et plus particulièrement les fonctions de directeur des études, que j'ai exercées pendant 5 ans. Le deuxième traite plus spécifiquement de ma participation au montage des dossiers relatifs aux actions scientifiques et socio-économiques de l'école. Le dernier concerne mes différentes fonctions électives.

I.4.1 Organisation pédagogique de l'ENSAIT

I.4.1.1 Direction des études

D'octobre 1990, date de mon arrivée à l'ENSAIT, à octobre 1995, le directeur de l'école m'a demandé d'assurer la direction des études. Cela a représenté pour moi une lourde charge, à une époque où l'établissement était en pleine restructuration pédagogique et structurelle avec la création de nombreux postes d'enseignants-chercheurs. Les tâches qui m'ont alors été confiées sont les suivantes :

- Mise en place d'un nouveau cursus et des emplois du temps pour les 3 années ingénieur, avec tous les difficultés que cela comporte,
- Mise en place d'un secrétariat des études et d'un conseil des études,
- > Préparation des états de service des enseignants,
- ➤ Gestion des stages en entreprises des 1^{ère} et 2^{ème} années, par le biais de conventions,
- ➤ Gestion du planning des salles de cours, de TD et des laboratoires de TP souvent partagés avec le lycée voisin,
- Préparation des soutenances de mémoires de fin d'étude et des jurys de fin d'année,
- Contact et disponibilité auprès de 220 étudiants et 30 enseignants pour résoudre les nombreux et divers problèmes qui se posent au quotidien.

Cette période a été très enrichissante. Elle m'a appris à entretenir de bons rapports humains avec l'ensemble des personnels (équipe pédagogique, personnel AITOS), afin de résoudre plus facilement les problèmes de tous ordres, en évitant les conflits.

Ces contacts privilégiés m'ont permis de mieux connaître l'ensemble du corps enseignant (renouvelé à 75% par la création de nouveaux postes) et de bien comprendre les motivations

de chacun, y compris vis à vis de la recherche. Cette activité m'a également donné une vue globale des différents secteurs d'activité possibles au sein du GEMTEX et m'a guidé pour la mise en place de ma nouvelle thématique de recherche caractérisée par une forte transversalité

I.4.1.2 Responsabilité d'un centre de concours de l'ENSAIT

Depuis mon intégration à l' ENSAIT je participe chaque année au déroulement du concours de l'école en tant que responsable de centre. Cette mission à haute responsabilité, d'une durée de 3 jours, est décisive pour le bon recrutement des élèves-ingénieurs, mais délicate de par les risques encourus (exemple : pertes de copies) qui entraîneraient automatiquement l'annulation du concours.

I.4.1.3 Responsabilité des laboratoires de CA0

Depuis plusieurs années, j'ai pris en charge la responsabilité des deux laboratoires de CAO de l'ENSAIT. Je m'occupe du laboratoire de CAO/DAO mécanique et de la cellule flexible de CAO/FAO confection. J'interviens à la fois dans la conception des programmes pédagogiques et dans la gestion matérielle et financière. Mon principal souci est de faire évoluer régulièrement ces laboratoires, qui pourraient devenir rapidement obsolètes, compte tenu de leur caractère hautement technologique (informatique, technologie laser, ultrasons, etc.).

I.4.2 Aspects scientifiques et socio-économiques

Cette section met en évidence la nécessité d'établir des contacts étroits avec le monde socioéconomique pour définir une politique scientifique en adéquation avec la réalité industrielle.

I.4.2.1 Relations avec les institutions

Les relations avec les institutions régionales (dans le cadre du Contrat de Plan Etat Région - CPER) et nationales telles que l'ANVAR ou d'autres organismes de l'Etat susceptibles de participer au financement de la recherche textile sont fondamentales.

C'est ainsi que, de 1994 à 1998, l'équipe que j'anime a contribué à l'émergence de la thématique "Textiles à Usages Techniques" du CPER. Cette thématique a été élaborée au sein d'un groupe de travail qui a réuni ITF(Nord), ENSAIT-GEMTEX, le Conseil Régional, la DRIRE, l'ARD², le Clubtex³. J'ai participé activement à la rédaction du dossier scientifique et à la mise en place des fiches de demandes d'investissement, ainsi qu'à la rédaction des rapports intermédiaires de suivi du projet. Dans ce cadre, une aide du FEDER et de la région Nord - Pas de Calais a permis de cofinancer les travaux relatifs à la modélisation dynamique des tissus. Ce projet a fortement aidé au démarrage de l'équipe par le financement d'une thèse à 100% [**Th2**].

Par ailleurs, avec l'aide de la DATAR, j'ai pu financer l'achat d'un matériel lourd (découpeur à lame vibrante) débouchant sur l'étude et le développement d'un découpeur ultrason de formes complexes pour les tissus techniques [Mémoire de maîtrise de Laurent SAINT MARTIN].

-

² **ARD** : **A**gence **R**égionale de **D**éveloppement.

³ Clubtex : Club des industriels du textile de la région Nord – Pas de Calais.

I.4.2.2 Relations avec les industriels

En 1999 avec le Professeur CASTELAIN, j'ai conforté mon partenariat avec la société LECTRA SYSTEMES par un contrat de recherche sur 3 ans, pour la modélisation des tissus d'habillement [**Th3**]. Dans le domaine des Textiles à usage Technique, des négociations sont en cours avec la société Hexcel Fabrics.

I.4.3 Fonctions électives

Elles concernent essentiellement le conseil scientifique et le conseil d'administration de l'ENSAIT.

I.4.3.1 Conseil scientifique

Mes fonctions de directeur des études et mon implication dans le fonctionnement de l'école m'ont amené à participer à la création du laboratoire GEMTEX. J'ai donc été amené à participer au conseil scientifique de l'ENSAIT de 1991 à 1995. Dans ce cadre, j'ai contribué à la définition des profils des postes à pourvoir, en fonction des besoins de l'école, tant sur le plan pédagogique que sur le plan de la recherche. En 1995, j'ai assuré la vice-présidence du conseil scientifique.

I.4.3.2 Conseil d'administration

De 1991 à 1995, j'ai été membre du conseil d'administration de l'ENSAIT. Cela m'a permis de participer à l'élaboration de la politique générale de l'école et notamment à la profonde restructuration opérée durant cette période. Par la même occasion, j'ai pu exposer au sein de ce conseil les différentes actions à mener pour la mise en place du nouveau laboratoire de confection. J'ai également exposé les priorités qu'il me semblait utiles de définir pour répondre aux fortes demandes des industriels de ce secteur. Ma proposition a été suivie par le conseil d'administration. Cela m'a permis de concrétiser l'un des projets phares de l'ENSAIT (cellule de confection et collaboration LECTRA).

I.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les activités que j'ai pu exercer depuis mon arrivée à l'ENSAIT m'ont révélé tout l'intérêt qu'il peut y avoir à développer une recherche en liaison étroite avec le monde industriel. Cela est particulièrement vérifié dans une école telle que l'ENSAIT, dont la vocation technologique et l'implication dans l'industrie textile sont très marquées.

Pour cela, la mise en place d'une structure de simulation et d'essais pratiques sur les textiles associée à différents modèles mathématiques n'a pu se réaliser que grâce à une collaboration soutenue avec le secteur industriel, tant en recherche qu'en formation continue. La participation à la formation continue du secteur industriel dans le même domaine de compétence que celui de nos travaux de recherche est déterminante. En effet, elle contribue à la remontée d'informations de terrain qui permettent d'orienter la stratégie de développement et d'être réactif à l'apparition de matériaux nouveaux.

Les travaux de recherche mené depuis 1992 font apparaître trois grands axes de développement : la modélisation du fil et du tissu, l'identification des paramètres des modèles de fil et de tissu et enfin la simulation de ces modèles en vue d'applications bien ciblées. Pour l'avenir, les applications les plus stratégiques de ces travaux semblent se situer dans les

domaines de l'habillement et des Textiles à usage Technique. Nous avons pu en montrer l'intérêt économique.

Dans la continuité de ces travaux, nous souhaitons développer un nouveau modèle volumique 3D utilisant le formalisme de Lagrange comme pour le modèle de fil. Les masses de la cellule de base deviennent alors indépendantes et libres spatialement. Cette nouvelle structure se rapproche encore plus fidèlement d'une structure tissée. Cette voie nécessitera d'étudier les phénomènes de contact entre objets. Le formalisme de Lagrange étant axé sur des méthodes énergétiques, nous pourrons également intégrer des perturbations extérieures (chaleur, humidité, etc.), difficile à mettre en oeuvre avec le principe fondamental de la dynamique.

La seconde partie de ce mémoire développe en détail l'ensemble des travaux déjà réalisés, ainsi que les travaux prospectifs visant à définir les orientations futures.

PARTIE.II

ACTIVITES DE RECHERCHE : MODELISATION, IDENTIFICATION ET SIMULATION DES STRUCTURES TEXTILES

P.BRUNIAUX - 40/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

II.1. MODELISATION

II.1.1 Introduction

La section II.2 présente l'ensemble des travaux sur la modélisation des structures textiles. Il n'est pas possible de mettre en place un modèle de tissu sans prendre en compte le domaine d'application de celui-ci. En effet, le textile se distingue des autres secteurs industriels par la diversité de ses applications. Cette diversité permet de classer les activités textiles en deux grands domaines d'applications : le textile—habillement et les Textiles à usages Techniques (TuTs). Dans les deux cas, l'approche la plus souvent rencontrée pour l'étude des textiles est une approche mécanicienne. En ce qui nous concerne, nous nous sommes efforcés d'exploiter des analogies (par exemple électromécaniques), afin de développer une approche plus générique, c'est à dire une approche système. La réflexion sur la modélisation, présentée ciaprès, résulte des travaux de recherche sur la modélisation des actionneurs incrémentaux que nous adaptons au domaine du textile.

II.1.1.1 Réflexion sur la modélisation

L'objectif de la modélisation est d'analyser les problèmes dans le monde réel, de synthétiser des solutions à ces problèmes ou de développer des théories pour les expliquer. Une des premières étapes dans une telle tâche est le développement d'un modèle mathématique du phénomène à étudier. Ce modèle ne doit pas être trop simpliste car il pourrait conduire à éluder des phénomènes intimes indispensables à sa validation. Il ne doit pas non plus être trop complexe. Le compliquer entraînerait des difficultés d'analyse. Une bonne modélisation revient donc à trouver un bon compromis.

La modélisation peut être abordée par une approche analytique définie par l'enchaînement de 9 étapes successives [BRO90] (cf. Figure II-1).

- 1. La première étape vise à définir l'objectif du modèle. Les domaines d'application et d'utilisation de celui-ci sont parmi les points les plus importants de cette étape.
- 2. La frontière entre le système à modéliser et son environnement doit être clairement définie. Cette frontière doit intégrer toutes les composantes représentatives du système qui peuvent être représentées par différents sous ensembles ou sous modèles, tels que les sous-ensembles A, B, et C de la Figure II-1. Lors de la définition de la frontière, il est important de vérifier que les interactions entre chaque sous ensembles soient précisées. L'environnement peut agir sur le système par son entrée S₁, alors que la sortie ne doit pas affecter l'environnement. Si le sous-ensemble A ne présente aucun intérêt pour l'étude, le regroupement de B et C, avec comme entrées S₂ et S₄, peut être effectué. Par contre, le sous-ensemble C a peu de chance de constituer un système isolé car l'une de ses sorties S₅ modifie son entrée S₃ à travers le sous-ensemble B. Il est donc impératif de satisfaire aux conditions suivantes : toutes les entrées doivent être connues ou supposées connues ou encore peuvent être commandées indépendamment de l'état interne du système.

Exemple : Le système de la Figure II-2 illustre le fonctionnement d'un actionneur incrémental. Le sous-système S_2 , purement mécanique, est parfaitement défini si la variable d'entrée C_m (couple moteur) est accessible à la mesure (c'est à dire connue), la sortie P étant la position. Dans le cas du système S_1 , la frontière intègre en plus les phénomènes électriques. C_m devient alors une

variable interne et U_A et U_B (tensions de commande) représentent les entrées principales du système.

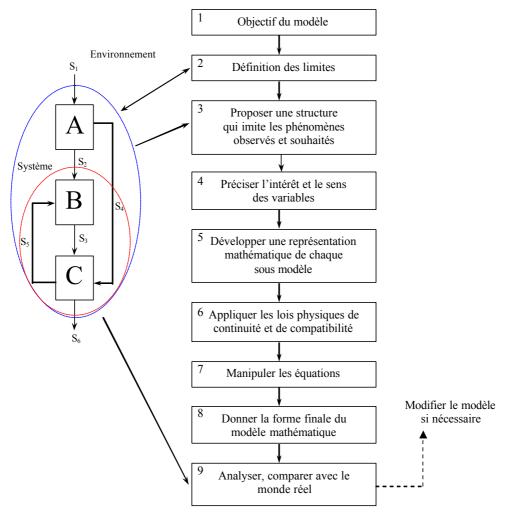


Figure II-1 : Approche analytique de la modélisation

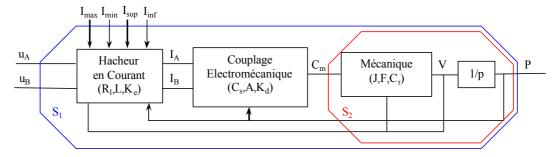


Figure II-2: Modèle et sous-modèles d'actionneur incrémental

3. Quels que soient les systèmes physiques à modéliser (électrique, mécanique, thermique), ils sont dotés de mécanismes de stockage, d'absorption ou de transfert d'énergie. La troisième étape de la modélisation consiste à décomposer le système réel en une interconnexion d'éléments simples et idéalisés qui préservent le caractère de ces opérations. Pour un système électrique, un schéma électrique illustre une telle idéalisation, avec des sources idéales de tension ou de courant représentant les entrées. Les composantes du modèle sont alors des résistances, des capacités, des selfs... Dans les systèmes mécaniques, des assemblages idéalisés de points massiques, de ressorts et d'amortisseurs sont souvent utilisés. Ce processus de modélisation est

P.BRUNIAUX - 42/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

- désigné sous le nom de modèle physique ou modèle boite blanche. Le niveau du détail exigé dépend du type d'information prévu dans le modèle.
- 4. Un modèle correctement choisi offre les mêmes caractéristiques principales que le système réel. Lors de la mise en place du modèle mathématique, les variables doivent être judicieusement choisies afin de prendre en compte l'ensemble des centres d'intérêt. Il est nécessaire de retourner à l'étape 3 si un centre d'intérêt est absent et doit être intégré au modèle. On trouve souvent deux types de variables : les variables de type vitesse (flux) et les variables de type potentiel. Les variables de type vitesse traversent les dipôles et gardent la même valeur à l'entrée et à la sortie de celui-ci. Les exemples les plus courants sont le courant électrique, la force, le couple, la vitesse d'écoulement des fluides, le débit d'un liquide. Les variables de type potentiel ont des valeurs différentes entre l'entrée et la sortie du dipôle. Les exemples sont la tension, l'allongement, la position ou la vitesse, la température, la pression.
- 5. Chaque dipôle élémentaire est associé à des variables de type vitesse et potentiel liées à lui-même. Quel que soit le dispositif, il existe des relations mathématiques reliant les deux types de variables. Ces relations, appelées équations élémentaires, doivent être indiquées pour chaque élément dans le modèle. Cette étape peut entraîner le rajout d'une variable non perçue au début de l'étude et conduirait au retour à l'étape 4. En exemple, les équations élémentaires les plus connues sont les rapports courant-tension pour les résistances, les condensateurs, et les inductances ou les rapports contrainte-déformation pour les ressorts, les éléments visqueux. La forme de ces relations peut être traduite par des expressions algébriques, différentielles ou intégrales, linéaires ou non-linéaires, à coefficients constants ou variables dans le temps.
- 6. Après que le système ait été réduit à un système interconnecté d'éléments de base idéalisés avec des équations élémentaires connues, il reste à appliquer les lois physiques décrivant la dynamique du système. Indépendamment du type physique du système, il existe deux types de lois physiques qui sont nécessaires à cette fin. La première est le rapport de conservation ou de continuité des variables de type vitesse à chaque nœud, ces nœuds pouvant relier deux éléments ou plus. Les exemples de cette loi fondamentale sont les équations des nœuds de Kirchhoff, la seconde loi de Newton-d'Alembert, la conservation de la masse dans les problèmes de fluide, ou de l'énergie. La deuxième loi vérifie les états de compatibilité des variables de type potentiel. La loi des mailles de Kirchhoff appliquée à un réseau d'éléments imbriqués les uns dans les autres est un exemple type. On retrouve des lois semblables lorsque l'on observe les vitesses, les chutes de pression, et les baisses relatives de température. Ces deux lois nous amènent au système d'équations du modèle intégrant les deux types de variables.
- 7. Cette étape consiste à manipuler les équations élémentaires, de continuité et de compatibilité pour obtenir la forme finale du modèle souhaité.
- 8. Il est alors nécessaire de préparer le modèle pour l'associer à un processus d'itération en vue de sa simulation.
- 9. Une analyse et une comparaison entre le monde réel et le monde virtuel est effectuée dans des conditions similaires. Si un écart trop important entre ces deux mondes existe, une modification du modèle doit être envisagée.

A partir de cette approche analytique de la modélisation, nous allons montrer dans le paragraphe suivant comment elle peut s'appliquer au domaine textile.

II.1.1.2 Modélisation des structures textiles

La première étape n'est autre que la définition du domaine d'application du modèle (cf Figure II-3, où les étapes définies ci-dessus sont repérées en rouge). Dans ce cas, deux domaines peuvent être envisagés : le Textile-Habillement (TH) et les Textiles à usages Techniques (TuTs). Cela nous a amenés à la réflexion suivante : observe-t-on une nappe de tissu comme une surface sans épaisseur ou comme une structure filaire sans ou avec une épaisseur ? Lorsque l'on observe le comportement dynamique du tissu dans le secteur textile habillement, le drapé statique ou dynamique du tissu sur un mannequin est prioritaire. Dans le cas des tissus à usages techniques, on s'intéresse surtout aux sollicitations du tissu soumis à de fortes contraintes.

La deuxième étape découle des domaines d'application car les besoins de modélisation de ces deux secteurs industriels sont très spécifiques. Cela se traduit par la mise en place de deux modèle de tissu :

- > le modèle surfacique 3D (application TH),
- ➤ le modèle volumique 3D (application TuTs).

Pour ce dernier modèle, il est nécessaire de concevoir, au préalable, un modèle linéique 2D, qui est intégré au modèle volumique 3D.

Les limites de modélisation, associées à l'échelle d'observation du phénomène, définissent la qualité de la modélisation. Dans le premier cas, il est possible de linéariser les lois de contrainte/déformation. Cela nous permet d'atteindre des temps de calcul très courts lors de la simulation. Par contre, la précision des résultats n'est pas absolue. Les limites de modélisation sont plus étendues dans le second cas. En effet, comme nous le verrons à l'étape 3, la méthode d'observation des variables internes du système conduit à une modélisation à structure parallèle modulaire qui permet de prendre ou ne pas prendre en compte certains comportements physiques. L'avantage de cette approche est de pouvoir étudier et intégrer plus facilement les non-linéarités de chaque comportement dynamique. Cela nous conduit à une représentation plus fine des phénomènes mécaniques. L'inconvénient majeur de cette approche est l'importance des temps de calcul.

L'étape 3 montre que le modèle surfacique 3D globalise chaque élément simple idéalisé sous forme de coefficients caractéristiques de comportements dynamiques du modèle volumique 3D. La non prise en compte d'un comportement dynamique pour le modèle surfacique revient à la mise à 0 du coefficient concerné de la matrice de rigidité. La représentation de chaque modèle met alors en évidence les notions de petites déformations (matrices ou modèles de déformation) et de grands déplacements (modèle dynamique).

La définition des variables de l'étape 4 et des équations élémentaires de l'étape 5 est de traduire la déformation d'une structure textile dans un repère euclidien à 3 dimensions, autant dans les applications TH que TuTs. Pour cela, il est nécessaire d'exprimer les variables de déformation e en fonction des variables de contrainte s suivant les 3 axes du repère, en translation et en rotation. Dans le cas du modèle surfacique 3D, les matrices de rigidité relient ces deux types de variables. Dans le cas du modèle volumique 3D ou linéique 2D, chaque expression des différents comportements dynamiques (sous-modèles) traduit ce lien. L'évolution dynamique de chaque point massique dans l'espace est définie par le vecteur (position, vitesse, accélération) conditionné par la masse ramenée sur chaque point de la structure, par les effets tels que, par exemple, la viscosité du milieu ambiant.

L'étape 6 montre que selon le type de modèle utilisé, deux formalismes sont employés pour appliquer les lois physiques : soit le principe fondamental de la dynamique (modèle

force/géométrie), soit le formalisme de Lagrange (modèle énergétique). Le modèle volumique 3D par le formalisme de Lagrange est en cours de développement.

Les étapes 7, 8 et 9 (simulation et validation) sont intégrées dans les autres chapitres du rapport.

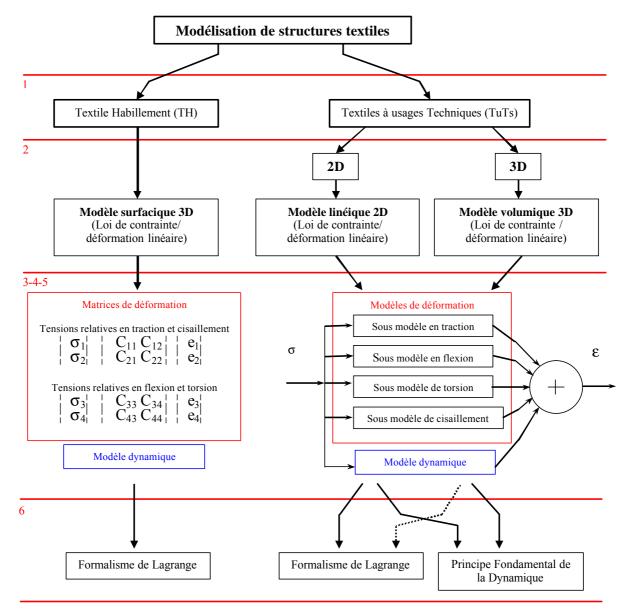


Figure II-3 : Les différentes étapes de la modélisation des structures textiles

Une approche analytique est utile mais non suffisante pour modéliser un système. Il est important de s'appuyer sur l'ensemble des travaux de la communauté scientifique travaillant dans ce domaine pour compléter cette stratégie. Dans ce sens, un bref historique des études antérieures permettra de positionner nos travaux et de comprendre le choix de nos orientations.

II.1.1.3 Positionnement des travaux

Compte tenu du caractère vivant et quelquefois imprévisible de cette matière souple qu'est le tissu, la modélisation du drapé et du comportement dynamique des tissus s'inscrit parfaitement dans le savoir-faire et la sensibilité textile. Toutefois, dès les premières recherches bibliographiques, l'enthousiasme de travailler sur une telle matière se transforme

petit à petit en inquiétude devant l'absence d'outil d'aide à la modélisation dynamique de ce matériau.

La micro-géométrie des tissus et les caractéristiques physiques des matériaux utilisés situent les tissus dans la classe des surfaces : discontinues, anisotropes, d'élasticité non-linéaire, de comportement de type grandes déformations – petits déplacements, sujettes à l'hystérésis.

L'étude d'un tissu en tant qu'élément surfacique n'a pas fait l'objet de nombreux travaux. L'intérêt de traiter le problème du comportement dynamique des tissus s'est manifesté il y a une quinzaine d'années, avec les premières recherches en infographie [WEI86] s'intéressant aux plis formés par les tissus sous certaines conditions. Cette recherche avait des buts économiques et industriels visant à créer un modèle représentant la dynamique des tissus. La simulation du tombé d'un tissu, associé à la création d'un vêtement, peut éviter certaines formes d'essayage dans la haute couture. Dans ce contexte, l'étude présentée ne s'intéresse qu'à la modélisation et la simulation d'un tombé de tissu.

Les premiers travaux s'intéressant au parcours du fil dans une structure tissée ont été ceux de Peirce [PEI30-1]. Il a effectué un travail fondamental sur la mise en place d'un modèle de tissu exprimant les composantes élémentaires de la géométrie des textiles. Son approche mécanique et physique permet d'intégrer dans son modèle les principales propriétés, c'est-à-dire la rigidité à la flexion, la résistance à la compression, l'épaisseur du tissu et le frottement de surface de tissu. Peirce a développé également quelques mesures telles que la densité, l'extensibilité, etc.

A partir de ce modèle, différents chercheurs ont proposé d'autres modèles en modifiant les hypothèses de Peirce [KEM63]. On peut citer les travaux de Leaf [LEA64] et Olofsson [OLO64] en 1964 et de Grosberg en 1966 [GRO66]. Les principales modifications apportées par ces travaux portent sur : la forme ellipsoïdale de la section du fil au lieu d'une section circulaire, la trajectoire de l'axe du fil de forme droite ou sinusoïdale. Grosberg a aussi travaillé sur le comportement en flexion des structures textiles surfaciques. Cela nous ramène à nouveau à une structure surfacique. Il a modélisé ce comportement à partir d'un système multicouches dans lequel sont définies deux zones : une zone où la pression entre les fibres est faible et permet le glissement entre ces fibres, une zone où la pression entre les fibres est grande interdisant tout glissement entre fibres. La formalisation du comportement en flexion fait apparaître le moment de flexion, le moment dû aux forces de frottement dans la structure, la rigidité à la flexion et le rayon de courbure. Abbott met en évidence la relation liant les composantes de la résistance élastique et les paramètres de contexture [ABO73]. Pour cela, il utilise le modèle de Peirce pour analyser le comportement en flexion de l'armure toile. Dans une première phase, il développe son analyse pour une structure relaxée, où les fils enlevés deviennent rectilignes mais conservent leurs contraintes internes. Son formalisme intègre les forces élastiques de flexion, l'énergie totale de déformation, l'énergie élastique de déformation dans le fil ondulé. Dans une seconde phase, Abbott considère un tissu relaxé où les fils gardent une forme ondulée. Il simplifie son modèle en considérant que la force élastique de flexion ne dépend plus de l'énergie élastique de déformation dans le fil.

Différents modèles de tissu ont été présentés par Kawabata. Au début des années 70, il a défini un modèle relatif à la traction bi-axiale [KAW73-1]. La structure du tissu est alors inspirée du modèle de Peirce, mais représentée de façon différente. Les fils de chaîne et de trame sont représentés par des lignes qui se brisent en deux points sur l'axe perpendiculaire au plan du tissu. Lorsque le tissu subit une traction bi-axiale, Kawabata déduit les équations des allongements dans le sens chaîne et trame en se basant sur des considérations géométriques données par son modèle. Il propose de traiter le problème selon que les fils sont compressibles ou incompressibles. Les équations élaborées sont modifiées en conséquence. A partir de cette

analyse, il traite aussi la traction uni-axiale. Dans ce cas, il annule une des forces qui agit sur le système [KAW73-2]. Kawabata s'est également intéressé aux problèmes de cisaillement [KAW73-2]. Ces différentes études lui ont permis de mettre au point une chaîne de mesure K.E.S.F. (Kawabata Evaluating System for Fabrics) [KAW73-3] qui caractérise et qualifie le tissu dans son adaptabilité au corps humain, dans le confort qu'il procure en habillement, dans son aspect visuel et aussi dans son état de surface. Finalement, Linberg établit la relation liant les propriétés mécaniques élémentaires du tissu et ses qualités de mise en forme pour l'habillement [LIN60]. Les propriétés mécaniques qu'il met en avant sont : la rigidité à la flexion, l'extensibilité, l'équilibre et la stabilité dimensionnelle. L'ensemble de ces travaux est fortement orienté vers la modélisation de certains essais mécaniques effectués sur le tissu.

Une autre catégorie de travaux plus récents a été ensuite menée sur la recherche de formes. Différentes approches ont été envisagées, soit par des méthodes géométriques, soit par des méthodes mécaniques ou par des méthodes énergétiques.

- L'objectif des méthodes géométriques est de fixer un certain nombre de points de passage obligé (contour) et de déterminer une surface dont on peut générer la géométrie [KUN90][TSO91]. En effet, une surface peut être définie comme le lieu géométrique d'une courbe génératrice qui se déplace en se déformant. On peut alors considérer que chaque sommet des différents polygones caractérisant la surface suit une trajectoire définie [BEZ86][GAR85]. Ces modèles donnent de bons résultats mais les grandeurs mécaniques et physiques sont inexploitées.
- Les méthodes mécaniques reflètent plus la réalité. Ces méthodes tiennent compte des propriétés mécaniques du matériau et les calculent par des mesures et des essais. Il est évident que si les fils, composants élémentaires des tissus, ont un comportement élastique dans le cadre d'un usage habillement, les tissus présentent un comportement global non-linéaire [AMI89][CHE95]. Ceci résulte essentiellement du procédé de tissage, c'est-à-dire de la manière d'entrecroiser et de serrer les fils de chaîne et de trame (armure, réduction,...). Dans ce cas, une approche surfacique, utilisant une discrétisation par les éléments finis [ZIE77], est la plus appropriée pour la recherche de forme.
- Les méthodes énergétiques sont fondées sur le principe qu'un tissu, après relaxation, tend vers un état d'énergie minimale, dans lequel les forces et les couples internes et externes sont mécaniquement équilibrés. Le point de départ de ces méthodes consiste en l'identification et la formulation de toutes les contributions énergétiques élémentaires du système. Ce principe appliqué à l'étude des déformations des structures textiles, permet de mettre en évidence quatre termes essentiels d'énergie de déformation [JON77]: les énergies de flexion, de torsion, de compression latérale et d'extension longitudinale des fils.

La synthèse de ces travaux montrent que les démarches de chacun de ces chercheurs ont conduit à des résultats très intéressants et très encourageants, mais non finalisés. Lorsqu'ils évoluent sur de bons modèles, ils n'ont pas forcément la méthode pour identifier les paramètres de celui-ci. Ou encore, lorsqu'ils développent des moyens de mesure pour identifier certains paramètres du tissu, ils n'ont pas le modèle global de représentation ou n'ont pas l'objectif de simuler celui-ci. Néanmoins, quelques uns [AMI89][CHE95][CHE96] [PRO97][ASC96][TER87][TER88] ont eu une démarche donnant des résultats de simulation intéressants à partir de paramètres réellement identifiés, mais avec une tendance à considérer le tissu comme une surface et non une structure tissée de fil. De ces travaux, nous avons extrait les idées directrices qui ont marqué fortement notre stratégie de modélisation :

- ➤ modèles surfacique, micro-géométrique tridimensionnel, à particules [BRE94-1][BRE94-2], géométrique et dynamique,
- > sous-modèles de traction, de flexion, de cisaillement,
- énergies de déformation en traction, en flexion, en cisaillement, en torsion,
- > structure relaxée ou non,
- > contraintes internes et externes,
- objets déformables,
- > méthodes géométriques, mécaniques, énergétiques.

II.1.2 Modèle appliqué au th

II.1.2.1 Modèle surfacique 3D du tissu [Th1][P3][P8]

Le tissu possède un effet mémoire dans son comportement. Quasiment toutes ses déformations sont de type élastique. Les modèles à déformation élastique retrouvent leurs configurations de référence ou initiales dès que les forces appliquées causant cette déformation cessent d'exister. Aussi, l'expression de la déformation est la partie du modèle la plus importante car elle permet de mieux appréhender le caractère textile du matériau.

La formulation théorique des déformations d'un modèle surfacique s'exprime dans un repère euclidien à 3 dimensions où les positions de chaque point du matériau sont définies par :

$$r(M) = [r_x(u,t), r_y(u,t), r_z(u,t)]'$$
(II-1)

avec

 r_{x}, r_{y}, r_{z} : coordonnées du point M,

 $u = (u, u_1)$: coordonnées curvilignes de la surface du tissu,

t: temps.

La position du modèle dans la configuration stable (non déformée) ou initiale est spécifiée par :

$$r(M)^{0} = \left[r_{x}(u, t_{0}), r_{y}(u, t_{0}), r_{z}(u, t_{0})\right]$$
(II-2)

Un modèle dynamique est décrit complètement en fonction de ses coordonnées spatiales et du temps. Les grandeurs essentielles dans ce modèle sont :

- \triangleright la position du point M : r(M) ou r,
- ightharpoonup la vitesse du point M : $\frac{\partial r}{\partial t}$,
- ightharpoonup l'accélération du point M : $\frac{\partial^2 r}{\partial t^2}$.

Les équations décrivant la dynamique du modèle sont celles de Lagrange, elles expriment le mouvement d'un corps dans un référentiel d'inertie f par :

$$\mathbf{m}(u)\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} - \mathbf{g}(u)\frac{\partial r}{\partial t} + \mathbf{I}(u)r = f(u,t)$$
(II-3)

Pendant le mouvement, les forces externes f(u,t) équilibrent dynamiquement la somme des forces d'inertie dues à la densité de masse $\mathbf{m}(u)$, des forces de frottement dépendant de la vitesse $\mathbf{g}(u)$ et des forces internes au modèle $\mathbf{l}(u)$ qui s'opposent à la déformation.

Cette équation est valable pour les matériaux rigides. Elle ne peut pas être appliquée au tissu car les forces et les contraintes internes dans le tissu ne peuvent pas être ramenées à la simple expression I(u).r. Les forces internes qui agissent sur le tissu pour le ramener à sa position initiale peuvent s'exprimer par une fonction de variation d'énergie qui tient compte de la spécificité du matériau textile [C20][C21][C22]. La fonction que nous avons adoptée résulte de la théorie de la géométrie différentielle. Elle a fait l'objet de la thèse d'Adel GHITH [Th1]. Elle est représentée par l'expression x(r) intégrée dans les équations de Lagrange du mouvement, relatives aux modèles déformables, qui s'écrivent alors :

$$\mathbf{m}(u)\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} - \mathbf{g}(u)\frac{\partial r}{\partial t} + \mathbf{d}_{r}\mathbf{x}(r) = f(u,t)$$
(II-4)

Dans cette expression $\mathbf{x}(r)$ représente l'énergie de déformation qu'il nous reste à exprimer.

II.1.2.1.1 Evaluation de l'énergie de déformation et du terme $d_r x(r)$

A ce stade de l'étude, il est nécessaire d'avoir un outil pour comparer et identifier la déformation des solides dans l'espace. En effet, la forme tridimensionnelle d'un solide est déterminée par les distances euclidiennes et les angles entre les directions de ses points voisins. Ces données varient lorsque le solide se déforme et sont mesurées par le tenseur métrique $g_{ii}(r)$.

$$g_{ij}(r) = \frac{\partial r}{\partial u_i} \cdot \frac{\partial r}{\partial u_j} \tag{II-5}$$

D'après la théorie de la géométrie différentielle [BOS65][CHO68][THO79][TER88] deux propositions importantes émergent pour définir la forme des solides et des surfaces. La première proposition dit:

"Deux solides dans l'espace ont la même forme instantanée si, au même instant t, leur tenseurs métriques sont des fonctions identiques des coordonnées spatiales $u=(u_1, u_2, u_3)$ ".

Si un corps est fin dans une ou plusieurs de ses directions, alors une ou plusieurs dimensions sont très petites par rapport aux autres. Les distances entre ses points proches ne suffisent plus à déterminer sa forme. L'égalité des tenseurs métriques est nécessaire mais non suffisante pour déterminer la forme d'une surface dans l'espace. Une deuxième proposition est alors nécessaire :

"Deux surfaces ont la même forme si leurs tenseurs métriques et leurs tenseurs de courbures sont au même instant des fonctions identiques des coordonnées spatiales $u=(u_1, u_2)$ ".

Cette proposition est en accord avec le théorème de BONNET dont l'énoncé est le suivant :

"Une hypersurface de \mathbf{x}_n est entièrement déterminée, à un déplacement euclidien près, par la connaissance de ses deux premières formes fondamentales." [LEL63][LIC69]

P.BRUNIAUX - 49/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

La deuxième forme fondamentale est donnée par le tenseur de courbure $b_i(r)$.

$$b_{ij}(r) = n \cdot \frac{\partial^2 r}{\partial u_i \partial u_j} \tag{II-6}$$

n représente le vecteur unitaire normal à la surface et s'écrit :

$$n = \frac{\frac{\partial r}{\partial u_1} \wedge \frac{\partial r}{\partial u_2}}{\left| \frac{\partial r}{\partial u_1} \wedge \frac{\partial r}{\partial u_2} \right|}$$
(II-7)

En utilisant les deux formes fondamentales, Terzopoulos et al. [TER87][TER88] définissent la fonctionnelle de l'énergie pour les solides et les surfaces comme l'intégrale de la norme euclidienne de la différence entre les tenseurs du solide déformé et les tenseurs du solide à l'état naturel pondéré par leurs coefficients de rigidité. Ainsi, pour une surface *S*, elle s'écrit :

$$\mathbf{X}(r) = \int_{\mathbf{I}} \left| g_{i,j} - g_{i,j}^{0} \right|_{w^{1}}^{2} + \left| b_{i,j} - b_{i,j}^{0} \right|_{w^{2}}^{2} du_{1}.du_{2}$$
(II-8)

Cette fonctionnelle tend à ramener les déformations des corps de type surfacique à leurs états naturels. La norme des matrices $\left|g_{i,j}-g_{i,j}^{}\right|_{w^1}$ et $\left|b_{i,j}-b_{i,j}^{}\right|_{w^2}$ est pondérée par les fonctions $w_{i,j}^1(u_1,u_2)$, $w_{i,j}^2(u_1,u_2)$. Ces fonctions caractérisent le matériau en intégrant les paramètres relatifs à la déformation de celui-ci.

La matrice $w_{i,j}^1 = \begin{pmatrix} w_{11}^1 & w_{12}^1 \\ w_{21}^1 & w_{22}^1 \end{pmatrix}$ exprime les tensions surfaciques auxquelles le tissu est assujetti pendant la déformation et est définie par :

- > w_{11}^1 : le coefficient de résistance à l'allongement sur l'axe u_1 (représentant par exemple le sens chaîne), qui est une fonction du module de Young dans le sens u_1 et du coefficient de Poisson,
- w_{22}^1 : le coefficient de résistance à l'allongement sur l'axe u_2 (représentant par exemple le sens trame), qui est une fonction du module de Young dans le sens u_2 et du coefficient de Poisson,
- $\triangleright w_{12}^1 = w_{21}^1$: les coefficients de résistance au cisaillement, qui peuvent être exprimés en fonction du module de Young et du coefficient de Poisson.

Il est tout à fait normal que cette matrice soit liée aux coefficients de la première forme fondamentale car elle caractérise les allongements dans le sens chaîne et trame et les effets de cisaillement.

La matrice $w_{i,j}^2 = \begin{pmatrix} w_{11}^2 & w_{12}^2 \\ w_{21}^2 & w_{22}^2 \end{pmatrix}$ exprime les tensions relatives à la flexion et à la torsion du tissu et est composée des termes suivants :

ho w_{11}^2 , w_{22}^2 : les coefficients de résistance à la flexion respectivement dans les sens u_1 et u_2

P.BRUNIAUX - 50/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

 $w_{12}^2 = w_{21}^2$: les coefficients de résistance à la torsion

Cette pondération est tout à fait attendue car les flexions et les torsions subies par le tissu ont une influence fondamentale sur la normale en chaque point de la surface.

Les différentes formes de contraintes présentes lors des déformations du tissu sont exprimées par la dérivée première de $\mathbf{x}(r)$ par rapport à la position r. Une approximation de cette dérivée est donnée par la formule suivante [TER87] [TER88] :

$$\boldsymbol{d}_{r}\boldsymbol{x}(r) = \sum_{i,j=1}^{2} -\frac{\partial}{\partial u_{i}} \left(w_{i,j}^{1}(u) \cdot (g_{ij} - g_{i,j}^{0}) \cdot \frac{\partial r}{\partial u_{j}} \right) + \frac{\partial^{2}}{\partial u_{i} \partial u_{j}} \left(w_{i,j}^{2}(u) \cdot (b_{ij} - b_{i,j}^{0}) \cdot \frac{\partial^{2} r}{\partial u_{i} \partial u_{j}} \right)$$
(II-9)

II.1.2.1.2 Evaluation du coefficient de frottement g(u):

Le frottement subi par le tissu est le coefficient le plus délicat à évaluer. Ce coefficient représente essentiellement la résistance engendrée par le milieu ambiant sur le tissu. Les hypothèses émises sur le coefficient de frottement sont :

- le frottement est fluide, il est associé à la vitesse de déplacement,
- ➤ il vérifie la notion de "dumping orthogonal" [GEO85][ZIE77].

g(u) est exprimé sous la forme :

$$g(u) = C_m \cdot m + C_k \cdot (w_{11}^1 + w_{22}^1)$$

expression dans laquelle C_m représente le coefficient de pondération de la matrice de masse \mathbf{m} et C_k le coefficient de pondération des matrices de rigidité w_{11}^1 , w_{22}^1

II.1.2.1.3 Evaluation des forces extérieures f(u,t):

L'application des forces extérieures au modèle permet de lui conférer une interaction avec le milieu extérieur. Généralement, les forces extérieures les plus utilisées sont :

- Les forces de pesanteur.
- Les forces aérodynamiques qui peuvent s'exprimer, par exemple, par l'action du vent sur le tissu,
- Les forces répulsives dues à la collision du modèle avec des objets impénétrables, statiques ou en mouvement.

L'objectif premier du modèle surfacique développé étant de visualiser uniquement le tombé d'un tissu, nous avons choisi d'intégrer uniquement les forces de pesanteur. Celles-ci dépendent de la distribution de la masse surfacique $\mathbf{r}(u)$ dans le tissu, de sa surface s, et de l'accélération de la pesanteur g et s'écrivent :

$$f(u,t) = \mathbf{r}(u).s.g \tag{II-10}$$

II.1.3 Modèles appliqués aux TuTs

L'analyse d'un matériau tissé montre qu'un tissu de base (ex : armure toile) est défini par l'entrecroisement de fils de chaîne et de fils de trame (cf. Figure II-4(a)). Dans une première

approche mécanique, il peut être assimilé à un système masse-ressort, c'est-à-dire, un système composé de ressorts reliant des masses entre-elles (cf. Figure II-4(b)).

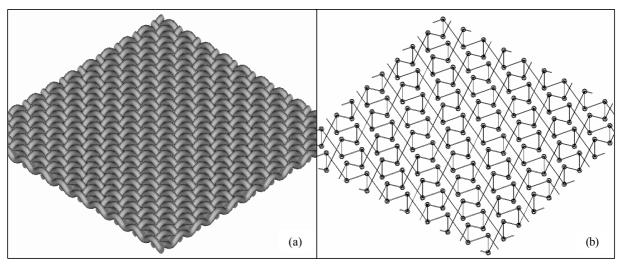


Figure II-4 : Détail de la structure d'un tissu - Maillage du tissu

Ce qui fait l'originalité de cette représentation est que nous considérons le tissu tel qu'il est, c'est-à-dire un matériau textile constitué de fils. Dans cette optique, la nécessité d'élaborer, au préalable, un modèle de fil apparaît naturellement.

II.1.3.1 Modèle linéique 2D de fil (PFD) [Th2][P4][P7]

Ce modèle de fil se présente comme un assemblage de barres jointives (cf. Figure II-5) dont la masse M_k est ramenée ponctuellement à chaque extrémité de ces barres .

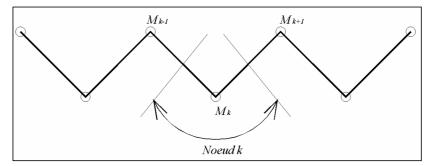


Figure II-5: Modèle de base du fil

L'utilisation de ce modèle nécessite de préciser l'état initial de chaque barre défini par leur longueur et leur orientation. Ces données traduisent la géométrie du fil dans un espace à deux, voire trois dimensions.

La dynamique de la structure géométrique du fil est décrite par une analyse mécanique [C24]. Ce travail nécessite un inventaire précis des sollicitations intervenant à chaque nœud. Les sollicitations susceptibles de modifier la dynamique d'un nœud M_k sont : les forces de pesanteur \vec{P} , les forces de traction longitudinale $\vec{F}_{tr,k,k-1}, \vec{F}_{tr,k,k+1}$, les forces de flexion $\vec{F}_{fl,k}$, les forces dues à la viscosité de l'air paramétrées par le coefficient n_k , la résultante des contraintes extérieures $\vec{F}_{ext,k}$. La Figure II-6(a) donne une représentation schématique de ce bilan.

Afin d'associer ces forces à la structure géométrique du tissu, il est nécessaire de les définir dans un espace vectoriel à trois dimensions

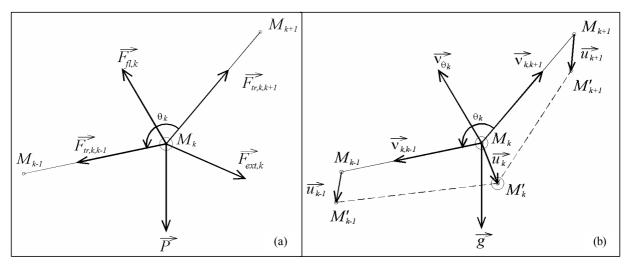


Figure II-6: Forces et déplacements relatifs à un nœud (a), notation vectorielle (b)

La notation vectorielle que nous avons utilisée, schématisée par la Figure II-6(b), est la suivante :

- $ightharpoonup \vec{n}_{k,k-1}$, $\vec{n}_{k,k+1}$ représentent les vecteurs unitaires associés respectivement aux barres positionnées par les nœuds M_k , M_{k-1} et M_k , M_{k+1} ,
- $ightharpoonup ec{q}_k$ est le vecteur porté par la bissectrice de l'angle q_k , \vec{u}_k , \vec{u}_{k-1} , \vec{u}_{k+1} définissent les déplacements respectifs des nœuds M_k , M_{k-1} , M_{k+1} ,
- \triangleright \vec{g} donne la direction de la force de pesanteur,
- $ightharpoonup q_k$ est l'angle entre les deux barres $M_k M_{k-1}$ et $M_k M_{k+1}$.

Ces vecteurs unitaires permettent de traduire les comportements en traction et en flexion du fil. Les vecteurs unitaires $\vec{n}_{k,k-1}$, $\vec{n}_{k,k+1}$, rattachés aux forces de traction, s'écrivent :

$$\vec{\boldsymbol{n}}_{k,k-1} = \frac{\overrightarrow{\boldsymbol{M}_{k}} \overrightarrow{\boldsymbol{M}_{k-1}}}{\left\| \overrightarrow{\boldsymbol{M}_{k}} \overrightarrow{\boldsymbol{M}_{k-1}} \right\|}, \vec{\boldsymbol{n}}_{k,k+1} = \frac{\overrightarrow{\boldsymbol{M}_{k}} \overrightarrow{\boldsymbol{M}_{k+1}}}{\left\| \overrightarrow{\boldsymbol{M}_{k}} \overrightarrow{\boldsymbol{M}_{k+1}} \right\|}$$
(II-11)

Le vecteur unitaire \vec{n}_{q_k} , rattaché aux forces de flexion, s'écrit sous la forme :

$$\vec{n}_{q_k} = \frac{\vec{n}_{k,k-1} + \vec{n}_{k,k+1}}{\|\vec{n}_{k,k-1} + \vec{n}_{k,k+1}\|}$$
(II-12)

Si $\vec{n}_{k,k-1} + \vec{n}_{k,k+1} = \vec{0}$, \vec{n}_{q_k} se déduit de $\vec{n}_{k,k-1}$ par un rotation de $+\frac{p}{2}$.

Ces vecteurs sont associées à des fonctionnelles définissant le modèle de représentation du comportement en traction du fil, appelé f_{tr} , et le modèle de représentation du comportement en flexion du fil, appelé g_{fl} . Ces fonctionnelles feront l'objet de chapitres spécifiques car il conduisent à la notion de sous-modèle.

A partir de ces notations, il est possible d'expliciter les relations mathématiques entre la géométrie du fil définie dans un espace à 2 ou 3 dimensions et les comportements mécaniques considérés.

Le comportement en traction de la barre $M_k M_{k-1}$, s'allongeant de $\mathbf{x}_{k,k-1}$ (allongement entre les barres $M_k M_{k-1}$, résultant des déplacements \vec{u}_k et \vec{u}_{k-1}), conduit à une force de réaction $\vec{F}_{tr,k,k-1}(\vec{u}_k,\vec{u}_{k-1})$ portée par $\vec{n}_{k,k-1}$ telle que :

$$\vec{F}_{tr,k,k-1}(\vec{u}_k, \vec{u}_{k-1}) = f_{tr}(\mathbf{x}_{k,k-1})\vec{\mathbf{n}}_{k,k-1} \tag{II-13}$$

Le comportement en flexion du fil induit, pour tout angle q_k au nœud M_k , une force de réaction $\vec{F}_{fl,k}(q_k)$ portée par le vecteur unitaire \vec{n}_{q_k} , telle que :

$$\vec{F}_{fl,k}(\mathbf{q}_k) = g_{fl,k}(\mathbf{q}_k)\vec{\mathbf{n}}_{\mathbf{q}_k} \tag{II-14}$$

Cette force correspond à la force résultante du couple de rappel d'un ressort spirale au nœud M_k .

Considérant la masse constante \mathbf{m}_k , associé au nœud M_k , la force de pesanteur \vec{P} s'écrit:

$$\vec{P} = \mathbf{m}_k . \vec{g} \tag{II-15}$$

Le Principe Fondamental de la Dynamique est ensuite appliqué à chaque nœud M_k pour traduire la dynamique de la structure géométrique. Ceci nous conduit au système d'équations suivant pour chaque nœud M_k :

$$\begin{cases}
\boldsymbol{m}_{k} \cdot \frac{\partial^{2} \vec{u}_{k}}{\partial t^{2}} + \boldsymbol{n}_{k} \frac{\partial \vec{u}_{k}}{\partial t} = \vec{H}(\vec{u}_{k}) + \vec{R} \\
\vec{R} = \boldsymbol{m}_{k} \cdot \vec{g} + \vec{F}_{ext,k} \\
\vec{H}(\vec{u}_{k}) = \vec{F}_{rr,k,k-1}(u_{k}, u_{k+1}) + \vec{F}_{rr,k,k+1}(u_{k}, u_{k+1}) + \vec{F}_{fl,k}(u_{k})
\end{cases}$$
(II-16)

Les équations de ce système traduisent le mouvement d'un nœud dans un fil. Nous avons volontairement décomposé cette expression en différentes équations afin de distinguer les termes relatifs à la déformation de la matière $\vec{H}(\vec{u}_k)$ des termes perturbés par le milieu ambiant.

II.1.3.1.1 Sous-modèle de traction

Les forces de traction $\vec{F}_{tr,k,k-1}$, $\vec{F}_{tr,k,k+1}$ du modèle de fil font nécessairement intervenir le comportement en traction du fil. En prenant comme hypothèse que M_{k-1} , M_{k+1} sont des points fixes, le déplacement \vec{u}_k du nœud M_k entraı̂ne l'allongement $\vec{x}_{k,k-1}$ de la barre $M_k M_{k-1}$ devenant alors $M_k' M_{k-1}'$. La réaction $\vec{F}_{tr,k,k-1}$ portée par $\vec{n}_{k,k-1}$ s'écrit :

$$\vec{F}_{tr,k,k-1} = f_{tr}(\mathbf{x}_{k,k-1})\vec{\mathbf{n}}_{k,k-1} \tag{II-17}$$

Dans cette expression, f_{tr} est le modèle de représentation du comportement en traction du fil. De manière similaire, nous obtenons l'expression de la force $\vec{F}_{tr,k,k+1}$ qui s'écrit :

$$\vec{F}_{tr,k,k+1} = f_{tr}(\mathbf{x}_{k,k+1})\vec{\mathbf{n}}_{k,k+1} \tag{II-18}$$

L'objectif de cette section est de déterminer la fonction f_{tr} . Par l'intermédiaire de tests réalisés sur un dynamomètre classique, il est possible de déterminer un modèle de représentation du comportement du fil sous sollicitation de traction. Ce modèle doit être sensible à l'influence de la vitesse, aux effets de la relaxation, à l'influence de l'hystérésis sur le phénomène.

Cette section détaille l'approche concernant la modélisation du comportement en traction du fil sous sollicitation discontinue. Cette approche est un modèle de comportement, établi à partir de l'analyse de la forme de la courbe de traction.

Après différents essais de traction à vitesse constante (V=10mm/min) sur un fil test, nous prenons la courbe moyenne de l'ensemble de ces essais (cf. Figure II-7).

Le modèle mathématique que nous avons choisi pour représenter cette courbe est :

$$K(\mathbf{x}_{k,k-1}) = a\,\mathbf{x}_{k,k-1} + b + c.\sin(d.(\mathbf{x}_{k,k-1} - e)).e^{f(\mathbf{x}_{k,k-1} - e)}$$
(II-19)

Ce modèle tient compte de la pente de la courbe par les coefficients a et b et de l'harmonique de forme sinusoïdal pondérée par les coefficients c,d,e. Cette distinction a l'avantage de linéariser le modèle dans le cas de l'utilisation de fil à usage technique.

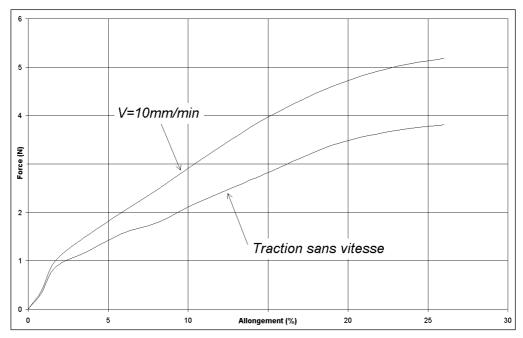


Figure II-7: Courbe moyenne de traction du fil

Dans cette expression, l'allongement $\mathbf{x}_{k,k-1}$ de la barre $M_k M_{k-1}$ est un allongement relatif (en %) par rapport à la longueur l_o de celle-ci au repos. Ce modèle de traction ne prend pas en compte l'influence de la vitesse de traction, des phénomènes de relaxation et de l'hystérésis.

Les étapes suivantes montrent comment intégrer à cette équation ces différents facteurs.

Influence de la vitesse de traction et de la relaxation

La Figure II-8 montre qu'une courbe de traction dépend de la vitesse de traction du fil. La courbe se décale vers le bas lorsque la vitesse diminue tout en pivotant autour de zéro. Cette constatation nous autorise à émettre l'hypothèse que la relaxation et l'influence de la vitesse sur le comportement en traction d'un fil sont étroitement liées.

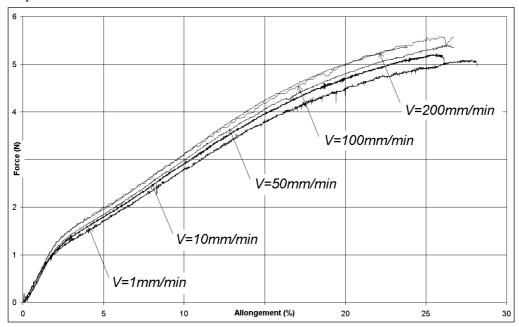


Figure II-8 : Tractions effectuées à différentes vitesses

Le modèle adopté fait alors apparaître deux comportements : un comportement élastique $K(\mathbf{x})$ (traité précédemment) et un comportement visqueux dépendant du temps. Ce modèle global de traction peut s'écrire sous la forme suivante :

$$f_{tr}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) = K(\mathbf{x}) + V(\dot{\mathbf{x}}, t)$$
 (II-20)

Le test de relaxation nous permet d'extraire en une seule opération le comportement visqueux dépendant du temps $V(\dot{\mathbf{x}},t)$ de la formule (II-10). La Figure II-9 correspond à différents tests de relaxation sur une durée de 500s, pour une courbe donnée (V=200mm/min).

Les effets de la vitesse de traction du tissu sont fortement liés au phénomène de relaxation de ce tissu, qui est une fonction du temps. Rappelons comment sont obtenues les différentes courbes de relaxation. L'état initial de chacune de ces courbes représente un point de fonctionnement d'une des courbes de traction de la . Ce point de fonctionnement est atteint après une traction de vitesse choisie (V=200mm/min). A partir de ce point, le fil est maintenu à allongement constant, la relaxation se traduit par une diminution de la force de traction. Après un certain temps, le phénomène se stabilise.

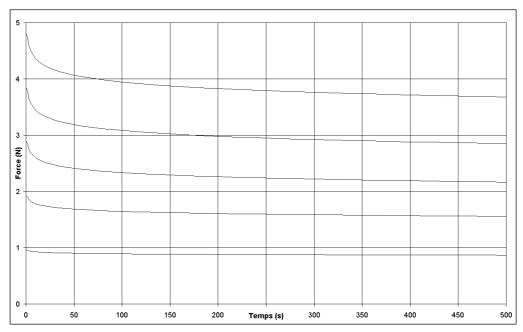


Figure II-9: Tests de relaxation d'un fil.

En soustrayant, à chaque point de fonctionnement de la courbe de traction jusqu'à rupture, la variation de la force de traction donnée par l'état final de chaque courbe de relaxation, nous pouvons obtenir le comportement hors relaxation, considéré comme purement élastique. Nous pouvons considérer que l'évolution de la force de traction (lors d'une relaxation), pendant un temps donné, se traduit par le passage d'une courbe de traction à une autre, prise à des vitesses de traction différentes. Ainsi, la courbe simulée "Traction sans Vitesse" de la Figure II-7 correspond à la partie $V(\mathbf{x},t)$ du modèle.

En tenant compte des résultats de la section précédente, il a été adopté :

$$K(\mathbf{x}) = a\mathbf{x} + b + c \sin(d \cdot (\mathbf{x} - e)) \cdot e^{f(\mathbf{x} - e)}$$
(II-21)

$$V(\mathbf{x},t) = Ae^{Bt} + Ce^{Dt}$$
 (II-22)

La fonction $K(\mathbf{x})$ traduit la forme de la courbe lorsque la vitesse de traction tend vers zéro. La fonction $V(\dot{\mathbf{x}},t)$ intègre le phénomène de relaxation dépendant du temps, implicitement lié à la variation de la vitesse de traction.

Influence de l'hystérésis

La Figure II-10 montre les effets d'hystérésis pris à différents seuils de sollicitations (x_I, F_I) . Ces courbes ont été obtenues avec une vitesse de traction identique lors de l'allongement ou de la réduction (après allongement) du fil. Nous avons volontairement changé de fil par rapport aux courbes précédentes afin de mettre en évidence ce phénomène plus distinctement.

P.BRUNIAUX - 57/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

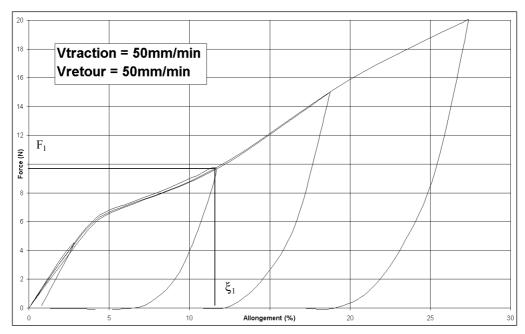


Figure II-10 : Comportement en hystérésis d'un fil

Il est indispensable que la fonction d'interpolation de la courbe d'hystérésis dépende du point (x_I, F_I) définissant l'état initial du retour à l'état de repos du fil. La courbe d'hystérésis peut être assimilée à la fonction suivante :

$$F(\mathbf{x}) = e^{\mathbf{a}(\mathbf{x} - \mathbf{b})} - 1 \tag{II-23}$$

avec

$$\mathbf{a} = \mathbf{g} \ln(\mathbf{x}_1) + 1$$
 et $\mathbf{b} = \mathbf{x}_1 - \frac{1}{\mathbf{a}} \ln(F_1 - 1)$ (II-24)

Modèle global de comportement en traction

A partir des différentes expériences et hypothèses présentées précédemment, il est possible de conclure cette section en définissant complètement le modèle de comportement en traction du fil. Le modèle global permettant d'intégrer l'ensemble des comportements mécaniques qui ont été présentés répond au système d'équations suivant :

$$f_{w}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) = \begin{cases} a.\mathbf{x} + b + c.\sin(d.(\mathbf{x} - e))e^{f(\mathbf{x} - e)} + Ae^{Bt} + Ce^{Dt} & si \dot{\mathbf{x}} \ge 0 \\ e^{a(\mathbf{x} - b)} - 1 & si \dot{\mathbf{x}} < 0 \end{cases}$$

$$avec \, \mathbf{a} = \mathbf{g}\ln(\mathbf{x}_{1}) + 1 \quad et \quad \mathbf{b} = \mathbf{x}_{1} - \frac{1}{\mathbf{a}}\ln(F_{1} - 1)$$
(II-25)

II.1.3.1.2 Sous-modèle de flexion

Comme il a été expliqué dans la partie II.2.2, le comportement en flexion du fil induit, pour tout angle \boldsymbol{q}_k au nœud M_k , une force de réaction $\vec{F}_{fl,k}(\boldsymbol{q}_k)$ (cf. Figure II-6(a)) portée par le vecteur unitaire $\vec{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{q}_k}$ (cf. Figure II-6(b)), telle que :

$$\vec{F}_{fl,k}(\mathbf{q}_k) = g_{fl,k}(\mathbf{q}_k)\vec{\mathbf{n}}_{\mathbf{q}_k} \tag{II-26}$$

Dans cette expression, $g_{fl,k}$ est le modèle de représentation du comportement en flexion du fil. En considérant que la flexion du fil est de type élastique linéaire pure, cette fonction peut être assimilée à l'expression suivante :

$$g_{fl,k}(\boldsymbol{q}_k) = C_f.l.(\boldsymbol{q}_k - \boldsymbol{q}_{k_0}) \tag{II-27}$$

 C_f représente le coefficient d'élasticité en flexion du fil et l la longueur totale des deux demi-barres associées au nœud.

II.1.3.2 Modèle volumique 3D de tissu (PFD) [Th2]

C'est à partir du modèle de fil, que nous avons conçu le modèle de tissu [C25]. Sa représentation de base, décrite à la Figure II-11, correspond au point de croisure d'un fil de chaîne avec un fil de trame. Ce modèle est composé de deux nœuds fil $M_{i,j,C}$ et $M_{i,j,T}$ et quatre demi-barres, chaque nœud associé à ses deux demi-barres voisines contribue à la description du modèle de fil [C23].

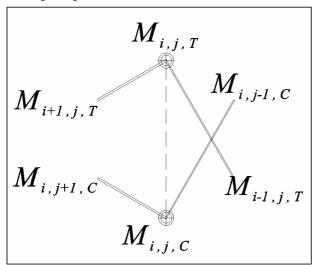


Figure II-11 : Géométrie de l'élément de base

Les hypothèses de travail que nous avons utilisées sont les suivantes :

- > non glissement entre le fil de chaîne et le fil de trame, le nœud tissu $M_{i,j}$ est considéré alors comme indéformable,
- > les quatre barres de chaque nœud ne travaillent qu'en traction,
- > les barres sont articulées entre elles par des liaisons de type rotule, laquelle autorise toutes les rotations mais interdit tous les déplacements.

Le nœud $M_{i,j,T}$ est situé sur un fil de trame et est affecté de la masse des deux demi-barres de trame $\mathbf{m}_{i,j,T}$. Le nœud $M_{i,j,C}$ est situé sur un fil de chaîne et est affecté de la masse des deux demi-barres de chaîne $\mathbf{m}_{i,j,C}$.

Afin de respecter le caractère textile du matériau, il est indispensable de traduire géométriquement l'armure et les conditions de tissage. Pour cela, les positions initiales et relatives des fils (barres), les uns(es) par rapport aux autres, doivent être précisées par la partie géométrique du modèle. Afin de traduire la dynamique de chaque élément de base dans le

tissu, un inventaire des forces engendrées dans les différents points de croisure doit être effectué. La partie mécanique intègre ce bilan auquel nous appliquons le PFD.

II.1.3.2.1 Partie géométrique

La géométrie est établie à partir du fait qu'un tissu est obtenu par l'entrecroisement de fils de chaîne et de fils de trame selon un mode de liage choisi. Ce mode de liaison s'appelle armure du tissu. La structure de base que nous allons définir peut prendre en compte différentes armures telles que : la toile, le sergé de 3, le satin... L'entrecroisement de la chaîne et de la trame conduit à l'ondulation des fils. Chaque demi-ondulation, qui s'étend d'un point de croisure au suivant, est symbolisée par un ressort, que nous qualifions de barre au sens de la RdM (Résistance des Matériaux), conformément au modèle de fil défini précédemment.

Un tissu peut alors être représenté comme un maillage de m x n nœuds élémentaires représentatifs des points de croisure. En fonction de l'armure choisie, le point de croisure aura des valeurs de paramètre géométrique différentes. Par contre la définition du point de croisure restera similaire.

Mais la géométrie d'un tissu ne s'arrête pas à la définition de son armure. Il est important d'inclure les paramètres de fabrication propres au tissage que sont le retrait (trame) et l'embuvage (chaîne), ainsi que le titre du (des) fils(s) constituant le tissu. Ces données expriment le caractère volumique d'un nœud, ce qui contribue au dimensionnement de la structure du matériau. Suivant les nombres de fils de chaîne et de trame utilisés, suivant les paramètres de tissage, il nous est alors possible de calculer la longueur, la largeur et l'épaisseur du tissu par un tissage virtuel de celui-ci.

La notion de retrait/embuvage (notés *ret* et *emb*) définie à partir des dimensions L_1 , L_2 , et L_1 ', L_2 ' (cf. Figure II-12) se traduit par les expressions suivantes :

$$ret = \frac{L_2 - L_1}{L_2}\%$$
 $emb = \frac{L_2' - L_1'}{L_2'}\%$ (II-28)

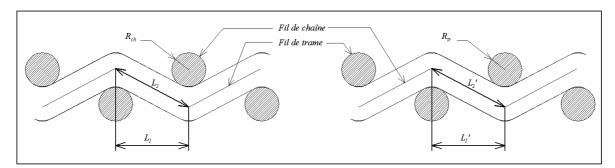


Figure II-12 : Géométrie de conception d'un tissu sous différentes coupes

Ces deux dernières équations intègrent implicitement d'autres paramètres physiques du fil que sont : d_{ch} , d_{tr} les densités des fils de chaîne et de trame, T_{ch} , T_{tr} leur titre en Tex (g/km) et R_{ch} , R_{tr} leurs rayons respectifs. Ils sont obtenus par l'analyse géométrique de la structure d'un tissu (cf. Figure II-12) et nous permettent de calculer :

$$L_2^2 = L_1^2 + (2.R_{ch})^2$$
 et $L_2^{'2} = L_1^{'2} + (2.R_{tr})^2$ (II-29)

A partir des équations (II-18) et (II-19), nous en déduisons L_2 , L_2 ':

$$L_2 = \frac{L_1}{1 - ret}$$
 et $L_2' = \frac{L_1'}{1 - emb}$ (II-30)

puis L_1 , L_1' :

$$L_{1} = \frac{2.R_{ch}}{\sqrt{(\frac{1}{1 - ret})^{2} - 1}} \qquad et \qquad L_{1}' = \frac{2.R_{tr}}{\sqrt{(\frac{1}{1 - emb})^{2} - 1}}$$
 (II-31)

Finalement, ces calculs nous amènent aux paramètres rayon des fils de chaîne et de trame qui sont fonction uniquement du titre et de la densité de ces fils :

$$R_{ch} = \sqrt{\frac{T_{ch}}{\boldsymbol{p}.d_{ch}}} \qquad et \qquad R_{tr} = \sqrt{\frac{T_{tr}}{\boldsymbol{p}.d_{tr}}}$$
 (II-32)

La connaissance des paramètres T_{ch} , d_{ch} , T_{tr} , d_{tr} et l'utilisation des formules (II-22) permettent de dimensionner virtuellement le nœud élémentaire, la connaissance du type d'armure permet de concevoir le tissu à partir de ce nœud. Les différentes contraintes de fabrication du tissu sont prises en compte dans une telle représentation géométrique. De plus, le fait que cette dernière fasse apparaître le tissu comme le maillage d'un élément de base, la simple observation de la géométrie du tissu permet de mettre en œuvre sa discrétisation spatiale. En conclusion, tout tissu, quelle que soit son armure, peut être représenté par un réseau de l'élément de base tel que nous venons de le définir géométriquement.

II.1.3.2.2 Partie mécanique

La partie mécanique permet de calculer l'évolution dynamique de chaque nœud agissant interactivement sous l'influence des contraintes extérieures. Pour cela, nous devons définir le bilan des forces engendrées au point de croisure.

Le maillage du tissu à l'aide de l'élément de base défini en 3D (Figure II-5), nous amène à une représentation surfacique de celui-ci en considérant le nœud global $M_{i,j}$ au milieu des nœuds $M_{i,j,T}$, $M_{i,j,C}$. Les contraintes mécaniques qui agissent sur cette surface, ramenées au nœud élémentaire (cf. Figure II-13(a)), peuvent se résumer à :

- \triangleright deux forces de pesanteur \vec{P}_C , \vec{P}_T ,
- \triangleright quatre forces de traction longitudinale $\vec{F}_{tr;i,j;i,j-1C}$, $\vec{F}_{tr;i,j;i,j+1C}$, $\vec{F}_{tr;i,j;i,j-1T}$, $\vec{F}_{tr;i,j;i,j+1T}$,
- \triangleright deux forces de flexion $\vec{F}_{fl;i,jC}$, $\vec{F}_{fl;i,jT}$,
- \triangleright des forces extérieures au tissu \vec{F}_{extC} , \vec{F}_{extT} .

A ce bilan doivent se rajouter les forces d'encombrement liées à la structure du tissu, c'est-àdire à l'interaction des fils les uns sur les autres, que nous expliciterons ultérieurement.

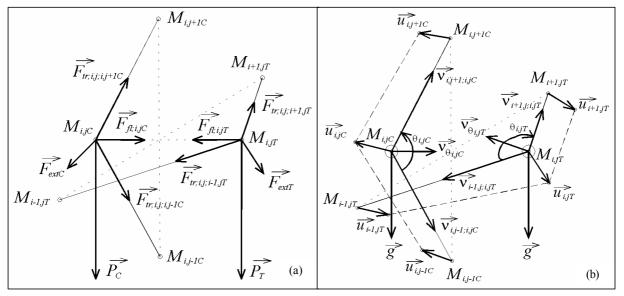


Figure II-13: Forces et déplacements relatifs à un nœud (a), notation vectorielle (b)

Pour décrire complètement le modèle de tissu, il est nécessaire d'associer ces forces à la structure géométrique du tissu en le définissant dans un espace à trois dimensions. La notation vectorielle que nous avons utilisée pour chaque nœud élémentaire $M_{i,j}$, schématisée par la notation vectorielle de la Figure II-13(b), est la suivante :

- $\vec{n}_{i,j-1;i,jC}$, $\vec{n}_{i,j+1;i,jC}$, $\vec{n}_{i-1,j;i,jT}$, $\vec{n}_{i+1,j;i,jT}$ représentent les vecteurs unitaires associés aux barres entre les nœuds respectives $M_{i,j-1C}$ $M_{i,jC}$, $M_{i,j+1C}$ $M_{i,jC}$, $M_{i-1,jT}$ $M_{i,jT}$, $M_{i+1,jT}$ $M_{i,jT}$,
- $ightharpoonup \vec{q}_{i,jC}$, $\vec{n}_{q_{i,jT}}$ sont les vecteurs portés par la bissectrice de l'angle $q_{i,jC}$, $q_{i,jT}$,
- $ightharpoonup ec{u}_{i,jC}, \ ec{u}_{i,jT}, \ ec{u}_{i,j}$ définissent les vecteurs déplacement des nœuds $M_{i,jC}, \ M_{i,jT}, \ M_{i,j}$
- \triangleright \vec{g} représente la direction de la force de pesanteur terrestre,
- ho $q_{i,jC}$, $q_{i,jT}$, traduit les angles entre les deux barres $M_{i,jC}M_{i,j-1C}$ et $M_{i,jC}M_{i,j+1C}$, et les barres $M_{i,jT}M_{i,j-1T}$ et $M_{i,jT}M_{i,j+1T}$.

Les forces d'encombrement traduisent les forces de réaction des fils les uns par rapport aux autres lors d'un contact. Ce contact est obtenu lors d'essais de traction ou de cisaillement du tissu. Elles garantissent un écartement minimal entre les nœuds, assurant la non pénétration des fils entre eux. Considérons quatre nœuds élémentaires voisins (cf. Figure II-14): $M_{i,j}$, $M_{i+1,j}$, $M_{i+1,j+1}$. Sous une sollicitation de cisaillement, ces quatre nœuds se déplacent simultanément jusqu'à obtenir un contact latéral entre les fils.

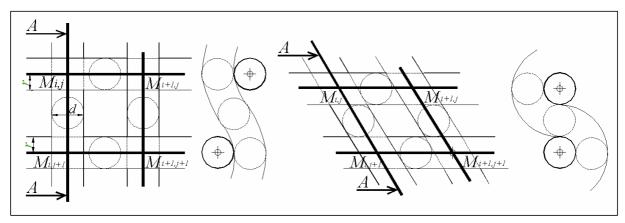


Figure II-14: Forces d'encombrement

Dans le modèle de tissu, les fils sont considérés comme étant incompressibles. Aussi, lorsque deux fils voisins viennent se mettre en contact, il faut s'assurer que les sollicitations ne les conduisent pas à s'interpénétrer. Pour cela, le modèle intègre des forces répulsives d'encombrement $F_{\rm enc}$ qui s'opposent au mouvement de pénétration uniquement. Ces forces agissent dès que la distance entre deux fils, selon l'axe perpendiculaire aux fils, est inférieure à la somme de leurs deux rayons et du diamètre du fil perpendiculaire. L'exemple de la Figure II-14 montre que la saturation du mouvement est obtenue dès que :

$$\overline{M_{i,j}.M_{i,j+1}} < 2r + d \text{ ou } \overline{M_{i+1,j}.M_{i+1,j+1}} < 2r + d.$$
 (II-33)

Modèle dynamique

Comme pour le modèle de fil, le PFD est appliqué sur le nœud élémentaire afin de définir le déplacement $\vec{u}_{i,j}$. Les équations décrivant le mouvement du nœud élémentaire $M_{i,j}$ sont les suivantes :

$$\begin{cases} \mathbf{m}_{,j} \cdot \frac{\partial^{2} \vec{u}_{i,j}}{\partial t^{2}} + \mathbf{n}_{i,j} \frac{\partial \vec{u}_{i,j}}{\partial t} = \vec{H}(\vec{u}_{i,j}) + \vec{R} \\ \vec{R} = \mathbf{m}_{,jC} \cdot \vec{g} + \mathbf{m}_{,jT} \cdot \vec{g} + \vec{F}_{ext,C} + \vec{F}_{ext,T} + \vec{F}_{enc.} \\ \vec{H}(\vec{u}_{i,j}) = \vec{F}_{tr;i,j;i,j-1C} + \vec{F}_{tr;i,j;i,j+1C} + \vec{F}_{tr;i,j;i,j-1T} + \vec{F}_{fr;i,j;i,j+1T} + \vec{F}_{fl;i,jC} + \vec{F}_{fl;i,jT} \end{cases}$$
(II-34)

 $\mathbf{n}_{i,j}$ est le coefficient de frottement visqueux à l'air au nœud $\mathbf{M}_{i,j}$ et $\mathbf{m}_{i,j} = \mathbf{m}_{i,jC} + \mathbf{m}_{i,jT}$

II.1.3.3 Modèle linéique 2D de fil (Lagrange) [Th3][P1][P6]

Le formalisme de Lagrange permet d'obtenir les équations du mouvement d'un système mécanique, composé de points massiques soumis à des contraintes géométriques et/ou cinématiques [**DEA6**][C19][GOL64]. Le système est décrit à l'aide de coordonnées q_i , i = 1,...,n définissant le vecteur $q = (q_1,...,q_n)^T$. Ces coordonnées s'appellent les coordonnées généralisées et sont choisies de sorte qu'elles indiquent la position et l'orientation de tous les composants du système à chaque instant.

Les équations de Lagrange pour un système en mouvement décrivent la relation entre l'énergie cinétique du système et la puissance des efforts appliqués à chaque particule à tout instant t:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_{i}} - \frac{\partial T(q,\dot{q})}{\partial q_{i}} = Q_{i} - \frac{\partial U(q)}{\partial q_{i}}, \ i \in [1,n]$$
(II-35)

où $T(q,\dot{q})$ est l'énergie cinétique du système, U(q) est l'énergie des efforts dérivant d'un potentiel (comme le poids) et Q_i sont les forces généralisées ne dérivant pas d'un potentiel U (comme les forces du friction).

Les contraintes appliquées au système s'expriment à l'aide des multiplicateurs de Lagrange s'ajoutant à celui-ci :

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_{i}} - \frac{\partial T(q,\dot{q})}{\partial q_{i}} = Q_{i} - \frac{\partial U(q)}{\partial q_{i}} + \sum_{j=1}^{m} \mathbf{1}_{j}G_{ji}$$
(II-36)

$$g_{j}(q,\dot{q},t) = 0, j \in [1,m]$$
 (II-37)

où m est le nombre de contraintes (holonome, cinématique et unilatéral), et G_{ji} est égal à $\frac{\partial g_{j}}{\partial q_{i}}$ si la contrainte g_{j} est holonome ou unilatérale, ou à $\frac{\partial g_{j}}{\partial \dot{q}_{i}}$ avec une contrainte cinématique.

Le lagrangien L, défini pour les coordonnées q_i et \dot{q}_i , i=1,...,n, est traduit par la forme $T(q,\dot{q})-U(q)$, et le système s'écrit :

$$\begin{cases}
\frac{d}{dt} \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_{i}} - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_{i}} = Q_{i} + \sum_{j=1}^{m} \mathbf{1}_{j} G_{ji} \\
g_{j}(q, \dot{q}, t) = 0, j \in [1, m]
\end{cases}$$
(II-38)

Dans un modèle masse-ressort, le fil est représenté par un ensemble de n barres sans masse, reliées entre elles par une liaison de type rotule. Chaque extrémité de barre est composée de nœuds de masse m. Chaque barre peut être assimilée à un système de Kelvin-Voigt composé d'un ressort de rigidité K_r , fonctionnant en parallèle avec un amortisseur visqueux de coefficient K_v . Ce type de représentation a de fortes similitudes avec le modèle de Vangeluwe [VAN96]. Pour exprimer le lagrangien, différentes étapes interviennent.

Etape 1 : Bilan des forces du système

Ce bilan conduit à séparer les forces dérivant d'un potentiel, des forces ne dérivant pas d'un potentiel. Les forces appliquées à chaque élément discrétisé sont définies comme suit :

1. forces dérivant d'un potentiel :

le poids du nœud : $\vec{P} = m\vec{g}$

la résistance à la flexion : $\vec{F}_{flexion} = -C_f \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{q}_0) \vec{u}_k$

la force de rappel du ressort de la barre k : $\vec{F}_r = -K_r(l-l_0) \frac{\overline{M_k M_{k+1}}}{\|\overline{M_k M_{k+1}}\|}$

2. forces ne dérivant pas d'un potentiel :

la force de réaction de l'amortisseur de la barre: $\vec{F}_v = -K_v \frac{\partial l}{\partial t} \frac{\overrightarrow{M_k M_{k+1}}}{\|\overrightarrow{M_k M_{k+1}}\|}$

la force de friction de l'air : $\vec{F}_{friction} = -C_{v} \frac{\partial(\mathbf{q}.l)}{\partial t} \vec{n}$

Etape 2 : Définition des coordonnées généralisées

Dans notre cas, les coordonnées généralisées $q_i = (l_i, \mathbf{q}_i)$ que nous avons choisies dépendent de la longueur de barre l_i et de \mathbf{q}_i angle entre la barre i et l'axe vertical (cf.).

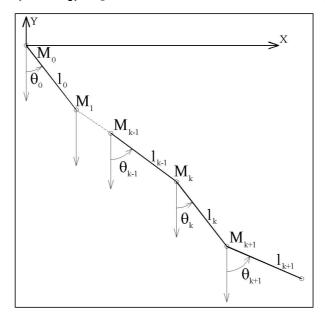


Figure II-15: Coordonnées généralisées

Les coordonnées absolues de chaque nœud sont exprimées comme suit :

$$x_{i}(t) = \sum_{j=1}^{i} l_{j}(t) \cdot \sin(\mathbf{q}_{j}(t))$$
 (II-39)

$$y_{i}(t) = \sum_{j=1}^{i} -l_{j}(t) \cdot \cos(\mathbf{q}_{j}(t)) \quad i \in [1, n]$$
(II-40)

Définissons les vitesses $v_{x_i}(t)$, $v_{y_i}(t)$ du nœud i à l'instant t, dans un référentiel galiléen R_g :

$$v_{x_i}(t) = \sum_{j=1}^{i} l_j(t) \cdot \dot{\boldsymbol{q}}_j(t) \cdot \cos(\boldsymbol{q}_j(t)) + \sum_{j=1}^{i} \dot{l}_j(t) \cdot \sin(\boldsymbol{q}_j(t))$$
 (II-41)

$$v_{y_i}(t) = \sum_{j=1}^{i} l_j(t) \cdot \dot{\boldsymbol{q}}_j(t) \cdot \sin(\boldsymbol{q}_j(t)) + \sum_{j=1}^{i} \dot{l}_j(t) \cdot \cos(\boldsymbol{q}_j(t)) \ i \in [1, n]$$
(II-42)

Etape 3 : Fonction de Lagrange

Le lagrangien est écrit après un bilan énergétique, c'est-à-dire :

énergie cinétique

L'énergie cinétique totale du système est égale à la somme des énergies cinétiques de chaque nœud :

$$E_c = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m.(v_{x_i}^2(t) + v_{y_i}^2(t))$$
 (II-43)

énergies potentielles

L'étape 1 montre que nous avons deux énergies potentielles : celle due à la force de pesanteur, celle associée au ressort et flexion.

L'énergie potentielle de la pesanteur est écrite comme suit :

$$E_{P_{gravit\acute{e}}} = \sum_{i=1}^{n} m.g.y_i(t)$$
 (II-44)

L'énergie potentielle associée au modèle de traction et de flexion est égale à :

$$E_{P_{g_{\text{clain}}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} . K_{r} . (l_{i}(t) - l_{0})^{2} + \sum_{i=2}^{n} \frac{1}{2} C_{f} . (\boldsymbol{q}_{i-1}(t) - \boldsymbol{q}_{i}(t))^{2}$$
(II-45)

L'énergie potentielle du système complet s'écrit alors :

$$E_{p} = \sum_{i=1}^{n} m.g.y_{i}(t) + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}.K_{r}.(l_{i}(t) - l_{0})^{2} + \sum_{i=2}^{n} \frac{1}{2}C_{r}.(\boldsymbol{q}_{i-1}(t) - \boldsymbol{q}_{i}(t))^{2}$$
(II-46)

Nous pouvons maintenant écrire le lagrangien L résultant de la différence entre l'énergie cinétique T et l'énergie potentielle U, d'où :

$$L = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m.(v_{x_{i}}^{2}(t) + v_{y_{i}}^{2}(t)) - \sum_{i=1}^{n} m.g.y_{i}(t) - \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} .K_{r}.(l_{i}(t) - l_{0})^{2} - \sum_{i=2}^{n} \frac{1}{2} C_{f}.(\boldsymbol{q}_{i-1}(t) - \boldsymbol{q}_{i}(t))^{2} (\text{II-47})$$

Etape 4 : Equations de mouvement du système

Les équations (II-38) et (II-47) décrivent le mouvement de notre objet. La forme matricielle d'un tel système se ramène à :

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q}) + k(q) = 0$$
 (II-48)

Cette représentation matricielle montre que ce système est clairement défini dans un espace d'état q, \dot{q} et \ddot{q} par ses 2n équations $(\boldsymbol{q}_1,...,\boldsymbol{q}_n,\dot{\boldsymbol{q}}_1,...,\dot{\boldsymbol{q}}_n,\ddot{\boldsymbol{q}}_1,...,\ddot{\boldsymbol{q}}_n,l_1,...,l_n,\dot{l}_1,...,\dot{l}_n,\ddot{l}_1,...,\ddot{l}_n)$.

II.1.4 Conclusion

Dans cette section nous avons présenté différents modèles de fils et de tissus. Selon les objectifs recherchés, nous utilisons des modèles de représentation différents, dans lesquels nous utilisons soit le Principe Fondamentale de la Dynamique, soit le formalisme de Lagrange. L'exploitation d'outils et de méthodes adaptées aux objectifs permet alors d'effectuer des développements plus poussés.

Chronologiquement, l'étude des structures textiles a démarré avec les travaux d'Adel Ghith [**Th1**]. Ces travaux, concrétisées par le développement d'un modèle surfacique 3D appliqué au TH, ont permis de mieux appréhender le caractère textile de ce matériau. Pour cela, les termes de déformation spécifiques à ce type de matériau ont été mis en évidence. De plus, cette voie de développement est très utile lorsque l'on souhaite mouler un objet ou vérifier le tombé d'un tissu, procédé que l'on retrouve dans les applications de mannequin virtuel (drapé sur un corps). Un autre atout est la rapidité de calcul lors de la simulation.

L'étude des structures textiles s'est ensuite complétée par les travaux de Xavier Legrand [Th2]. Il a su créer le lien entre un modèle linéique 2D de fil et un modèle volumique 3D de tissu. Cette vision a un double intérêt: simplifier les bases de données paramètres conséquentes dans un modèle de type surfacique et apporter des réponses objectives sur le comportement d'un fil dans une structure tissée. Par ailleurs, cette voie permettra, dans une étape ultérieure de remonter à l'échelle de la fibre en étudiant l'interface fils/fibres. Du point de vue de l'application, la finesse de modélisation est telle que la simulation des courbes d'essais de tests est envisageable (CAO TuTs), ainsi que le montre la thèse de Cyril Ngo Ngoc [Th3]. Cela présente un intérêt certain car nous verrons dans le prochain chapitre que les paramètres du modèle surfacique 3D sont extraits de ces courbes.

Enfin, la comparaison des résultats de simulation entre le modèle surfacique 3D et le modèle volumique 3D permet de valider mutuellement ces deux pistes de développement. En effet, le premier modèle peut être considéré comme un modèle global, qui a la capacité de lisser les phénomènes non linéaires, alors que le second modèle est un modèle relativement complet qui offre de nombreuses perspectives de développement.

II.2. IDENTIFICATION

II.2.1 Introduction

Une étude approfondie des différents modèles montre que, quel que soit le modèle utilisé, deux types de paramètres sont à considérer : les paramètres dynamiques et les paramètres dits de forme. Les paramètres dynamiques ont une très forte influence sur le tissu en mouvement. On peut citer, par exemple, les effets de la masse et du frottement visqueux dû au milieu ambiant sur le tombé et la souplesse d'un tissu lors du déplacement d'un mannequin. Les paramètres de forme agissent, quant à eux, sur la déformation du tissu ou le moulage de celuici sur un objet. Par exemple, le coefficient de flexion contribue au design de l'état statique d'une robe en 3D, ou encore, le coefficient d'allongement intervient fortement lors du recouvrement d'un siège automobile par une pièce de tissu. De ce fait, les paramètres dynamiques peuvent être qualifiés de paramètres « externes » au tissu car ils sont très sensibles à l'environnement extérieur. Par contre, les paramètres de forme constituent des paramètres «internes et intrinsèques» au tissu car ils sont très sensibles aux perturbations intimes de celui-ci. Dans ce sens, les premiers influent sur les grands déplacements du tissu, tandis que les seconds influent sur les petites déformations Dès lors, compte tenu de ces influences contradictoires dans le modèle, identifier de manière globale l'ensemble de ces paramètres constituerait une erreur. Une classification des paramètres doit donc être effectuée, afin de traduire la décomposition des modèles de fil ou de tissu en sous-modèles. Le critère de décomposition est défini en fonction des comportements statiques et dynamiques différentiant les paramètres de forme des paramètres dynamiques. Cette démarche est conforme à celle déjà adoptée dans des travaux antérieurs [PIN93] [BRU94].

Dans notre cas, il est, en outre, nécessaire d'évaluer la sensibilité de chacun des paramètres sur le comportement dynamique du système, afin d'éviter les effets de compensation paramétrique [thèse]. De nombreux travaux ont été menés dans ce sens pour l'identification des systèmes non linéaires. Ces travaux montrent l'intérêt qu'il y a d'utiliser la sensibilité des paramètres afin de mieux les discriminer, ce qui permet de les identifier séparément [LAU85] [NAK88] [GEI84].

La stratégie de modélisation nous a donc conduits à envisager deux types d'identification : l'identification des paramètres du modèle appliqué au TH et l'identification des paramètres du modèle appliqué aux TuTs.

La section suivante traite de l'identification des paramètres d'un tissu de type surfacique. Nous nous intéressons uniquement à l'identification des paramètres de déformation. Dans ce cas, nous pratiquons les tests couramment utilisés par les textiliens pour caractériser les matériaux. L'application envisagée est le drapé d'une nappe sur un objet plan [AMI89] [CHE95] [CHE96].

La section II.3.3 est axée, quant à elle, sur l'identification des paramètres d'un fil. Afin de montrer l'impact du choix de l'essai sur les résultats d'identification, une réflexion est engagée sur l'influence de la forme que prend le fil lors de cet essai. Les résultats de l'identification sont donnés en fonction du comportement dynamique du fil pour tenir compte de la stratégie de classification.

II.2.2 Identification du modèle applique au TH [P3]

Chaque paramètre est associé au test conduisant à la meilleure précision d'identification possible. Des échantillons spécifiques ont été conçus, afin d'évaluer l'influence de l'armure du tissu et l'influence de la nature du fil. Ce choix a été guidé par le contexte industriel. Le tissu de référence le plus couramment utilisé, qui permet d'effectuer les comparaisons, est conçu à partir d'une armure toile tissée à l'aide de fils de coton. Au fur et à mesure de la présentation des différentes techniques que nous avons utilisées pour identifier les paramètres du modèle, nous donnerons un tableau récapitulatif des résultats pratiques de nos 6 échantillons

II.2.2.1 Epaisseur du tissu :

L'épaisseur des tissus est une donnée à prendre en considération. Suivant la valeur de celle-ci, nous pouvons considérer le tissu en tant que surface ou en tant que volume.

Le principe de mesure de cette grandeur consiste à placer l'éprouvette de tissu entre deux plaques d'un appareil dédié à cette opération. Les deux plaques exercent une pression bien spécifié (P=2Kpa). Le résultat de cette mesure est donnée avec une précision de 0.2%. Les résultats pratiques sont donnés dans le Tableau 1.

Armure	Chaîne	Trame	Epaisseur (mm)
toile	coton	coton	0.47
satin	coton	coton	0.62
sergé	coton	coton	0.57
toile	polyester	coton	0.47
toile	coton	polyester	0.44
toile	polyester	polyester	0.43

Tableau 1 : Epaisseur des échantillons

Nous pouvons constater que l'épaisseur des différents tissus est d'environ 0.5mm. Elle est légèrement plus importante pour un satin ou un sergé. Ceci est dû aux flottés plus importants dans cette armure. Ces faibles valeurs nous permettent de considérer ces tissus comme des structures surfaciques. En conclusion, il n'est pas possible de simplifier la fonctionnelle de l'énergie en ne prenant que le tenseur métrique.

II.2.2.2 Masse surfacique r(u):

La masse surfacique peut être obtenue expérimentalement en découpant des échantillons de tissus ayant une surface donnée (minimum 100 mm²) et en les pesant avec une balance précise au millième de gramme. Le Tableau 2 résume les résultats de cette pesée.

Armure	Chaîne	Trame	Masse (g/m²)
toile	coton	coton	192.6
satin	coton	coton	189.7
sergé	coton	coton	187.3
toile	polyester	coton	192.7
toile	coton	polyester	195.3
toile	polyester	polyester	179.5

Tableau 2 : Masse surfacique des échantillons

Nous constatons que la masse surfacique de tous les tissus est sensiblement la même. Cela est dû au fait que les masses linéiques des fils de coton et de polyester sont très proches.

II.2.2.3 Coefficients de résistance à l'allongement w_{11}^1 , w_{22}^1 :

La valeur de ces paramètres a été obtenue par l'intermédiaire des courbes de traction du tissu. L'appareil de mesure utilisé est un dynamomètre Autotrac.



Figure II-16: Test de traction MTS

Cet appareil, présenté en Figure II-16, permet d'effectuer des tractions successives avec des vitesses de sollicitation variables dans les sens chaîne et trame. Les conditions de tests sont les suivantes :

- La traction doit se faire jusqu'à la rupture de l'éprouvette,
- ➤ La durée de l'essai est égale à 30 secondes avec une tolérance de ± 5 secondes,
- Les éprouvettes ont les dimensions suivantes : 50mm en largeur et 200mm en longueur après effilochage,
- Le conditionnement des éprouvettes s'effectue à 20°±2°C et 65%±2%Hr,

Après différentes mesures, nous avons constaté que la vitesse de déplacement de la pince qui respecte les conditions d'essais (durée de l'essai) doit être de 100mm/min.

La courbe donnée par la Figure II-17 représente l'allongement de notre échantillon de base (toile coton-coton) dans le sens chaîne et trame. L'exemple de calcul est donnée par rapport à cet échantillon.

Ces diagrammes se composent de 3 zones distinctes :

la zone (a) est *la zone de faibles contraintes* dans laquelle se produit l'alignement des fils et des fibres dans le tissu. On la considère comme linéaire. Cependant, dans le cas d'une étude de drapé, nous faisons l'hypothèse que le tissu est soumis à de faibles efforts. Le module de Young *A* est ainsi évalué dans cette zone.

- ➤ la zone (b) est *la zone de fortes contraintes* dans laquelle le comportement élastique est caractérisé par le module de Young *E*.
- la zone (c) est le début R de rupture de l'échantillon.

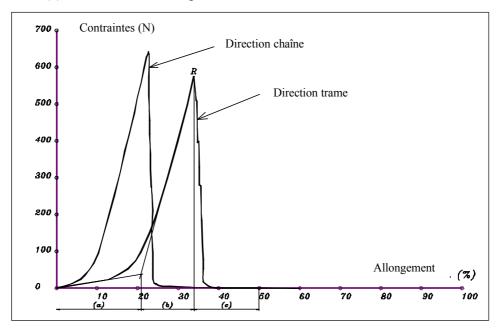


Figure II-17 : Courbes force/allongement en chaîne et en trame

Le coefficient w_{11}^1 est obtenu à partir de la courbe traction en chaîne. En accord avec la loi de Hooke, appliqué à la zone (a), nous avons :

$$\mathbf{S} = w_{11}^{1}.\mathbf{e} \tag{II-49}$$

expression dans laquelle, s représente les contraintes de tension (N/mm²), e la déformation et w_{11}^1 le module de Young. Ces limites ont un lien direct avec les courbes force/allongement selon les expressions suivantes :

$$\mathbf{S} = \frac{\Delta F}{S} \tag{II-50}$$

$$\boldsymbol{e} = \frac{l - l_0}{l_0} \tag{II-51}$$

(II-50) est le rapport entre la force F (newton) de traction et la section S de l'échantillon de tissu (50mm x 0.47mm = 23.5mm²). (II-51) est le rapport en (%) entre l'allongement l-l0 du tissu et sa longueur initiale l0 (200mm). La zone (a) de la courbe force/allongement donne directement la contrainte ΔF en fonction de l'allongement relatif e (%). (II-50), (II-51) et (II-52) donnent :

$$w_{11}^{1} = \frac{\Delta F}{S.e}$$
 (II-52)

Le coefficient w_{22}^1 est obtenu par une méthode similaire. Il suffit de remplacer w_{11}^1 par w_{22}^1 dans la formule (II-49) et d'utiliser la courbe de traction dans le sens trame.

Armure Chaîne Trame W_{11}^{1} (N/mm²) W_{44}^1 (N/mm²) $25.\overline{34}$ toile 10.18 coton coton 5.16 7.98 satin coton coton 9 89 sergé 6.66 coton coton toile 12.69 25.64 polyester coton toile 9.56 29.22 coton polyester toile polyester polyester 16.61 30.23

Le Tableau 3 présente le récapitulatif des valeurs obtenues pour les paramètres w_{11}^1 et w_{22}^1 .

Tableau 3 : Coefficients de résistance à l'allongement des échantillons

Les résultats montrent que les modules d'élasticité w_{11}^1 , w_{22}^1 sont toujours plus importants lorsque la traction s'effectue sur le fil de polyester. La résistance à l'allongement de ce fil est beaucoup plus importante que celle du fil de coton. Par ailleurs, nous remarquons que l'armure toile résiste beaucoup plus à la traction que les armures sergé et satin. Ce résultat était prévisible car les fils d'une armure toile sont beaucoup plus imbriqués les uns dans les autres.

Par ailleurs, à faibles contraintes, le module d'élasticité w_{22}^1 est toujours supérieur à w_{11}^1 . Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que les fils de chaîne sont rendus moins résistant à la traction car ils sont soumis à une pré-tension lors de l'ourdissage et du tissage.

II.2.2.4 Coefficients de résistance au cisaillement $w_{12}^1 = w_{21}^1$:

Les essais précédents permettent d'observer des effets de striction lors de la traction des tissus. Cette réaction dans le sens perpendiculaire au sens de traction peut être utilisée pour obtenir les coefficients de cisaillement. Pour cela, nous mesurons le nombre de Poisson dans le sens chaîne et trame. Ce nombre correspond au rapport entre la striction transversale et l'allongement du tissu. La procédure de mesure est décrite ci-après.

Les échantillons sont marqués par un carré de coté a x a' $(a = a' = 30 \, mm)$ (cf. Figure II-18). Le principe de la mesure est d'obtenir la valeur du rapport $\frac{\Delta a'}{\Delta a}$, après un allongement relatif

$$\frac{\Delta L}{I}$$
 = 3%. Ce rapport représente le coefficient de Poisson \boldsymbol{n} .

A partir des coefficients de Poisson \mathbf{n}_{ch} (traction dans le sens chaîne), \mathbf{n}_{r} (traction dans le sens trame) et des précédents paramètres w_{11}^1 , w_{22}^1 , nous obtenons :

$$w_{12}^{1} = \frac{w_{11}^{1}}{\boldsymbol{n}}, w_{21}^{1} = \frac{w_{22}^{1}}{\boldsymbol{n}}$$

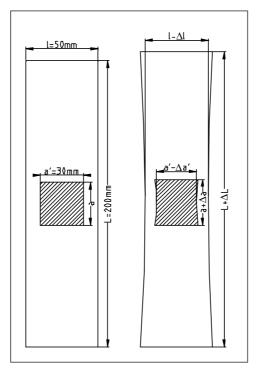


Figure II-18 : Dimension de l'échantillon avant et après le test

(II-53)

Le Tableau 1 présente le récapitulatif des valeurs obtenues des paramètres w_{12}^1 et w_{21}^1 .

Armure	Chaîne	Trame	W_{12}^{1} (N/mm ²)	$W_{\acute{e}1}^{1}$ (N/mm ²)
toile	coton	coton	4.5	27.15
satin	coton	coton	3.09	4.78
sergé	coton	coton	3.33	9.89
toile	polyester	coton	7.59	22.69
toile	coton	polyester	3.58	29.22
toile	polyester	polyester	8.3	15.11

Tableau 4 : Coefficients de résistance au cisaillement des échantillons

II.2.2.5 Coefficients de résistance à la flexion w_{11}^2 , w_{22}^2 :

L'exploitation de la courbe de flexion en chaîne et en trame de chaque tissu permet d'obtenir la valeur des différents coefficients de résistance à la flexion. L'appareil de mesure que nous avons utilisé est la machine de flexion de la chaîne de mesure de KAWABATA [KAW80] présentée en Figure II-19.

P.BRUNIAUX - 73/128 - (ENSAIT/GEMTEX)



Figure II-19: Test de flexion KES-FB1

La dimension normalisée de l'éprouvette est de 200mm x 200mm. Le principe de l'essai est le même dans le sens chaîne et dans le sens trame. Pour mesurer la rigidité à la flexion dans le sens chaîne, nous plaçons et fixons l'éprouvette entre les deux pinces (une fixe et une mobile) de façon à ce que les fils de chaîne subissent la flexion. Ensuite, la pince mobile effectue un mouvement de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à l'obtention d'un rayon de courbure de 2,5cm. Lorsque la pince mobile arrive à cette position, le sens de rotation s'inverse pour repasser sur la position de départ et atteindre un rayon de courbure de 2,5cm dans l'autre sens.

Enfin, la pince mobile effectue une dernière rotation dans le sens des aiguilles d'une montre pour revenir à la position de départ. Cette technique de mesure, nous permet d'obtenir le cycle d'hystérésis de l'essai. Un exemple relatif à notre échantillon de référence (toile coton-coton) est donnée en Figure II-20, pour le sens chaîne et trame.

Ces courbes représentent le moment de flexion M (gf.cm/cm or N.cm/cm) selon le rayon de courbure K (cm ⁻¹). Dans les divers intervalles dans lesquels le rayon de courbure prend la valeur [0.5,1.5] et [-1.5,-0.5], le dispositif de mesure extrait la valeur moyenne à partir de la pente B (N.cm²/cm), ainsi que la valeur moyenne de l'hystérésis 2HB (N.cm/cm). Pour obtenir le coefficient de flexion, nous devons appliquer la formule suivante donnée par le fabricant :

$$w_{11}^2 = B_{ch} \cdot K + 2HB_{ch} / 2 \tag{II-54}$$

$$w_{22}^2 = B_{_{I\!I}}.K + 2HB_{_{I\!I}}/2$$
 (II-55)

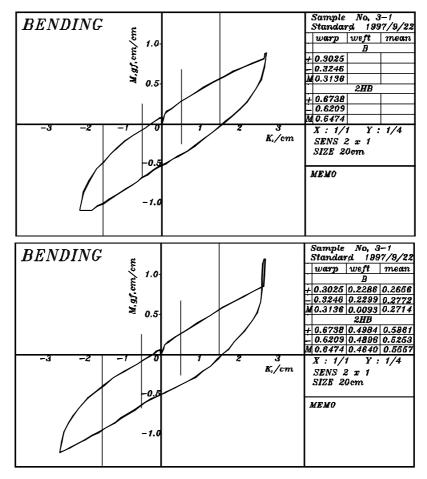


Figure II-20 :Diagramme du test de flexion en chaîne et en trame

Des données numériques résultant des diverses tables de la Figure II-20 et des expressions (II-54) (II-55), nous obtenons les valeurs suivantes consignées dans le Tableau 5.

Armure	Chaîne	Trame	W_{11}^{2} (N/mm ²)	$W_{\acute{e}\acute{e}}^{2}$ (N/mm ²)
toile	coton	coton	0.629	0.474
satin	coton	coton	0.173	0.147
sergé	coton	coton	0.208	0.214
toile	polyester	coton	0.331	0.393
toile	coton	polyester	0.359	0.38
toile	polyester	polyester	0.283	0.216

Tableau 5 : Coefficients de résistance à la flexion des échantillons

A partir des résultats obtenus, nous constatons que les tissus à armure toile sont plus résistants à la flexion que les tissus à armures sergé ou satin. Ce résultat était prévisible du fait que les fils sont plus entrecroisés dans les tissus en toile que dans les tissus en satin ou sergé. Nous constatons aussi que la rigidité à la flexion est sensiblement la même pour les tissus sergé et en satin.

II.2.2.6 Coefficients de résistance à la torsion $w_{12}^2 = w_{21}^2$:

La valeur de ces paramètres a été fixée à zéro. Nous justifions ce choix du fait que les torsions subies par les tissus sont négligeables, surtout lors d'une évolution dynamique où les forces aérodynamiques agissant sur le tissu sont nulles.

P.BRUNIAUX - 75/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

$$w_{12}^2 = w_{21}^2 = 0$$
 (II-56)

II.2.3 Identification du modele appliqué aux TuTs

L'analyse des 2 modèles linéiques de fil montre qu'ils sont globalement conditionnés par les mêmes paramètres dynamiques (2), mais qu'ils se différencient par leurs paramètres de forme (12 pour le modèle force/géométrie, 3 pour le modèle énergétique). Les paramètres dynamiques se traduisent par :

- > **m**_k ou m : masse linéique,
- \triangleright \mathbf{n}_k ou C_v : viscosité à l'air.

Les paramètres de forme du modèle force/géométrie agissent sur les comportements suivants :

- $\succ C_f$: comportement en flexion
- \triangleright a, b, c, d: comportement en traction simple
- ➤ A, B, C, D : comportement en traction/relaxation
- \triangleright a, b,g: comportement en traction/hystérésis

Les paramètres de forme du modèle énergétique se traduisent par :

- \triangleright C_f : comportement en flexion
- \triangleright K_r , K_v : comportement en traction (ressort + amortisseur visqueux).

Selon le type d'essais, il a été possible de tester la sensibilité des paramètres en dynamique (ex : le tombé d'un fil) et en statique (ex : l'essai de flexion). L'intérêt de passer de la dynamique à la statique est de vérifier la séparabilité des paramètres de forme des paramètres dynamiques.

II.2.3.1 Sensibilité des paramètres du modèle de fil en dynamique [P4]

Nous utilisons le tombé d'un fil pour tester notre modèle en dynamique. En pratique, ce tombé est obtenu de la manière suivante : nous tenons horizontalement à l'état initial un fil de longueur prédéfinie par ses deux extrémités, à l'instant t=0, nous lâchons l'une de ses extrémités et nous étudions l'évolution du fil dans le temps et dans l'espace jusqu'à l'équilibre dynamique de celui-ci. Par l'intermédiaire d'une caméra CCD, nous captons les différentes étapes de ce tombé que nous mémorisons dans un micro-ordinateur (cf. § II.3.3.4).

Cette étude s'opérant par simulation de notre modèle, il a été nécessaire d'effectuer une première série d'essais simulés (modèle force/géométrie) pour ajuster les paramètres de celuici afin que cet essai soit proche de l'essai réel. Les valeurs de certains paramètres ont été obtenues par des mesures textiles : mesure du poids par une balance, essais de traction et autres tests [KAW73-1]. Les autres paramètres ont été obtenus par une approche itérative, en considérant connus les paramètres mesurés précédemment. L'analyse des courbes de la Figure II-21 montrent que notre modèle, associé au vecteur des paramètres choisis, rapproche assez fidèlement le monde virtuel du monde réel. Etant donné que la précision absolue des paramètres du fil n'est pas requise à ce stade de l'étude, la superposition des courbes n'a pas été pas notre principal objectif. Les images réels ont été prises à une vitesse de 24 images/sec.

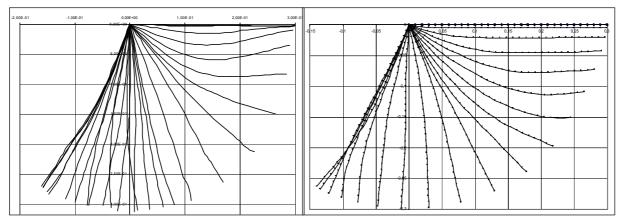


Figure II-21 : Tombé d'un fil réel (gauche) et d'un fil simulé (droite)

Les valeurs que nous avons obtenues pour l'essai simulé de référence sont :

 $T(tex) = 50 \text{ tex } (g/1000m), densité = 1.38.10^{+3} \text{ kg/m}^3$

$$c_f = 10^{-3} \text{ kg.s}^{-2}$$

$$\mathbf{n}_k = 1.82.10^{-5} \, kg.s^{-1}$$

$$\mathbf{m}_{\nu} = 5.10^7 \, kg \, (30 \, bares)$$

$$a = 0.12928039$$
, $b = 7.353632$, $c = 5.9485298$, $d = 0.3209873$

Les simulations des différents tombés utilisent comme période d'échantillonnage $T_e=10^{-7}$ sec. Afin de comparer avec précision les données simulées aux données réelles, nous avons conservé les mêmes instants d'observation que ceux pris pour la capture d'image, c'est-à-dire 24 images/sec.

Les essais présentés permettent de quantifier séparément l'importance de chaque paramètre dans le comportement dynamique proposé.

II.2.3.1.1 Influence du coefficient de frottement visqueux. n_{ν}

Les courbes de la Figure II-22 montrent que la variation du coefficient de viscosité agit sur la vitesse de la chute du fil. Une augmentation de ce coefficient freine le tombé de celui-ci. Ce résultat était tout à fait prévisible étant donné que le fluide devient plus visqueux, donc le fil a plus de difficulté à pénétrer dans ce fluide. L'effet d'amortissement est relativement sensible à cet essai.

P.BRUNIAUX - 77/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

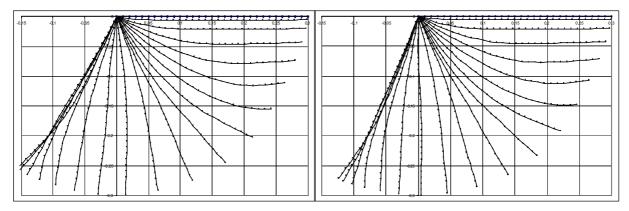


Figure II-22: Paramètre \boldsymbol{n}_k -10% (gauche), Paramètre \boldsymbol{n}_k +10%(droite)

II.2.3.1.2 Influence de la masse m_{i} ramenée en Tex

Les courbes de la Figure II-23 montrent que l'augmentation de la masse linéique du fil accélère sa chute et accentue les oscillations autour de sa position d'équilibre. Ce phénomène est cohérent avec la réalité car nous agissons sur l'inertie du système. En comparant au précédent coefficient, nous pouvons dire que nous avons des effets antagonistes.

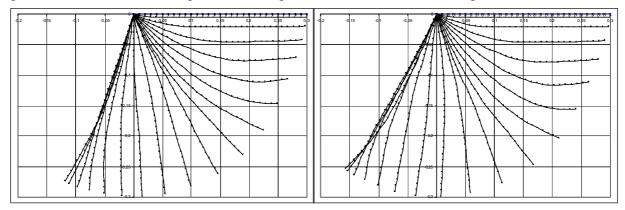


Figure II-23: Paramètre \mathbf{m}_{k} (Tex) -10% (gauche), Paramètre \mathbf{m}_{k} (Tex) +10% (droite)

II.2.3.1.3 Influence du coefficient de flexion c_f

Le coefficient de flexion ne modifie pas la position moyenne du fil lors de son déplacement, mais il agit surtout sur la forme que prend celui-ci lors du tombé [GOS90]. En comparant les deux essais (cf. Figure II-24), nous observons que l'état transitoire 15 se différencie par une courbure située à une position différente le long du fil. Ou encore, l'état 17 montre un sens de courbure inversé. Ces observations confirment qu'à la moindre variation du coefficient de flexion, le fil prend des formes différentes lors de son déplacement, tout en conservant ses positions moyennes d'évolution.

P.BRUNIAUX - 78/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

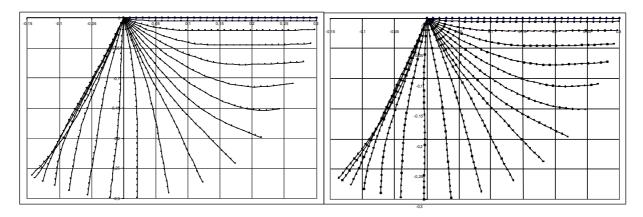


Figure II-24 : Paramètre c_f -10% (gauche), Paramètre c_f +10% (droite)

II.2.3.1.4 Influence du modèle de traction

L'objectif de cet essai est de vérifier si une linéarisation du sous-modèle de traction est possible. L'observation des courbes de la Figure II-25 montre que la linéarisation de la courbe de traction ne modifie pas le tombé du fil.

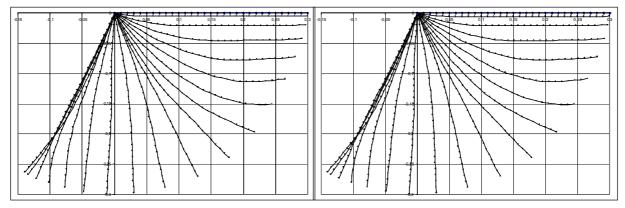


Figure II-25 : Courbe linéarisée de pente x (gauche), Courbe linéarisée de pente 10x (droite)

En augmentant la pente de la droite de la courbe de traction linéarisée, nous observons qu'il n'y a aucun effet sur le tombé du fil. Ce résultat était prévisible car les forces internes d'allongement sont déjà dans un état d'équilibre lors du lâché du fil.

II.2.3.1.5 Influence du nombre de nœuds N_b

En observant les courbes de la Figure II-26, nous voyons que l'augmentation du nombre de nœuds n'agit pas sur la dynamique du système. Cependant, pour une discrétisation spatiale correcte, il est nécessaire d'imposer à ce nombre une valeur suffisamment grande traduisant un échantillonnage spatial suffisamment fin. De ce fait, certains phénomènes locaux tels que le coup de fouet en bout de fil, sont mieux représentés. A contrario, l'échantillonnage fin augmente fortement les temps de calcul. Un compromis entre la précision de calcul et le temps de simulation est donc à établir. La valeur qui nous semble la plus apte à résoudre ce compromis est 31 nœuds pour une longueur de fil de **300** mm.

P.BRUNIAUX - 79/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

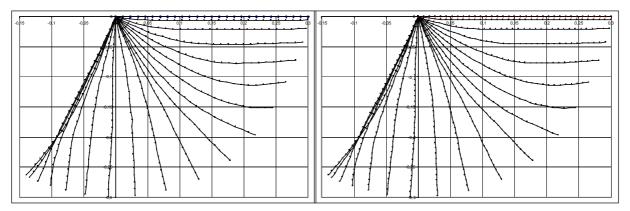


Figure II-26 : Nombre de nœuds 27 (gauche), Nombre de nœuds 35 (droite)

II.2.3.2 Sensibilité des paramètres du modèle de fil en statique [DEA11][P6]

L'essai en flexion du fil permet de tester le modèle en statique sous diverses contraintes [PEI30-2]. La manipulation de base à contrainte unique revient à faire dépasser progressivement le fil en dehors d'un support fixe (le bord d'un table) et de sauvegarder l'état statique des différentes phases de ce déplacement. Une caméra CCD permet de capturer les différentes images de ce comportement dans un micro-ordinateur. En simulation (modèle énergétique), cette manipulation est perçue différemment. Initialement, nous plaçons le fil à l'horizontale avec différentes longueurs de sortie. A l'instant t=0, celui-ci est lâché et tend vers sa position d'équilibre après un transitoire très court. Suivant les longueurs de sortie imposés, nous obtenons des positions finales différentes, lesquelles représentent les mêmes états statiques de l'essai pratique.

Quatre types de mesures sont mis en place pour tester la sensibilité des paramètres. Le première consiste à simuler le tombé de deux fils de même longueur et de coefficients de flexion identiques pour des masses linéiques différentes. Le deuxième revient à simuler le tombé de plusieurs fils de longueurs identiques mais à coefficient de flexion différent. Le troisième étudie la longueur de sortie du fil soumise à la pesanteur (les unités des axes de chaque figure sont données en mm). Le dernier est une étude de la forme que prend le fil lors de l'essai.

II.2.3.2.1 Influence de la masse linéique

La Figure II-27 représente deux fils de 28 barres de longueur 1mm pour un coefficient de flexion de 25.10⁻⁶ N.m.rad⁻¹ et pour des masses linéiques respectives de 15 et 20 Tex.

Une contrainte est imposée sur la première barre afin qu'elle reste horizontale. Nous constatons que le modèle traduit bien la réalité car la force de flexion tend à s'opposer au poids total du fil.

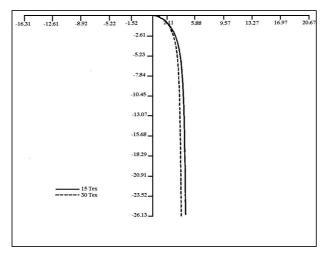


Figure II-27 : Influence de la masse linéique du fil

II.2.3.2.2 Influence du coefficient de flexion

La Figure II-28 représente 6 fils composés de 28 barres de 1 mm et de coefficients de flexion respectifs [1-10-25-50-100-200].10⁻⁶ N.m.rad⁻¹. Chaque fil fait 15 Tex. Les simulations sont conformes aux résultats attendus, plus le coefficient de flexion est important, plus le fil se rapproche de l'horizontale car il tend à s'opposer à la déformation en flexion.

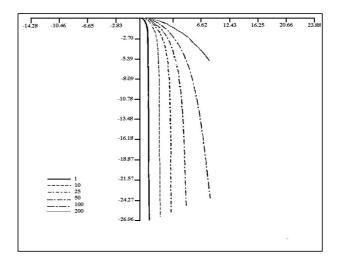


Figure II-28 : Influence du coefficient de flexion C_f

II.2.3.2.3 Influence de la longueur de sortie

La Figure II-29 représente la simulation du tombé de différents fils de longueurs différentes et de coefficient de flexion constant de 25.10⁻⁶ N.m.rad⁻¹. Cette procédure est équivalente à faire sortir le fil progressivement lors d'une dynamique lente (quasi-statique).

P.BRUNIAUX - 81/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

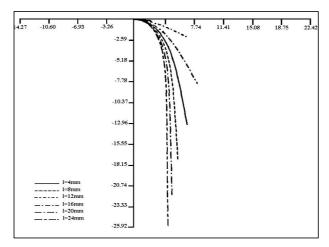


Figure II-29 : Influence de la longueur de sortie du fil

D'après la Figure II-29, nous observons que pour de faibles longueurs de sortie de fil, l'écart entre les différentes courbes est faible car l'effet du poids du fil est négligeable par rapport à celui de la force de flexion. Ensuite, au fur et à mesure que la longueur de sortie augmente, l'écart entre les courbes augmente pour passer à un maximum avant de diminuer car, à ce stade de l'essai, l'effet du poids total du fil compense celui de la force de flexion. On peut considérer que les paramètres dynamiques prennent alors le dessus sur les paramètres de forme. Cette réflexion rejoint celle qui a été proposée lors d'une étude similaire réalisée pour le tissu dans le cadre de l'étude du lieu géométrique occupé par l'extrémité du tissu lors du tombé en flexion.

Lors de l'expérience, il existe donc une longueur de fil optimale pour laquelle on obtiendra le maximum de précision dans le cadre d'une identification du coefficient de flexion.

Dans le but d'améliorer la précision de ce coefficient, une étude de forme a été réalisée afin de déterminer le type de courbe le plus sensible aux variations de ce coefficient.

II.2.3.2.4 Influence de la forme du fil

Nous nous sommes inspirés des travaux de Zhou [ZHO97-1][ZHO97-2][ZHO99-3] pour donner une conduite à ce travail sans pour cela se soucier de la mise en œuvre des manipulations. Les essais proposés se distinguent des précédents par leurs conditions initiales conditionnées par deux contraintes au lieu d'une.

Courbe "de la chaînette horizontale"

La courbe de la chaînette correspond à la forme prise par un fil pesant, flexible, homogène, inextensible, suspendu entre deux points. Dans ce cas précis, le coefficient de flexion est nul.

En imposant à la première et la dernière barre de rester horizontale, la courbe se déforme avec une tangente horizontale à ses deux extrémités. De ce fait, le coefficient de flexion intervient dans le conditionnement statique de l'essai.

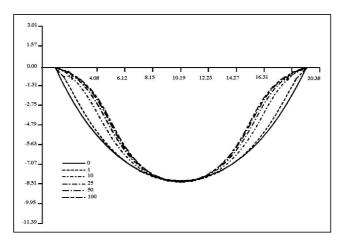


Figure II-30 : Influence du coefficient de flexion C_f

La Figure II-30 représente une famille de courbes correspondant aux coefficients de flexion [0-1-10-25-50-100].10⁻⁶ N.m.rad-¹ et pour un fil de 15 Tex. Le coefficient 0 correspond à la courbe de la chaînette. On observe que, plus le coefficient de flexion augmente, plus les courbes se rapprochent. Si on augmente la masse linéique du fil, l'écart entre les courbes augmente. Ce type d'essai peut donc être utilisé pour des coefficients de flexion en dessous d'un certain seuil pour une masse linéique du fil donnée.

Courbe "de la chaînette verticale"

La courbe de la chaînette montre que la flexion compense le poids du fil et qu'au delà d'un certain seuil de flexion, l'écart entre les courbes est minime. Nous avons par conséquent cherché à augmenter l'influence du poids en pivotant l'essai d'un angle de p/2. La Figure II-31 représente une famille de courbes de coefficients identiques au précédent essai. On remarque que l'écart entre les courbes de 50.10^{-6} et 100.10^{-6} $N.m.rad^{-1}$ est presque deux fois plus importants que dans le cas de la courbe de la chaînette horizontale. Dans le cadre d'une identification, la courbe de la chaînette verticale permet donc d'avoir une précision supérieure à celle de la courbe de la chaînette horizontale.

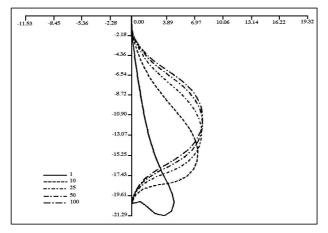


Figure II-31 : Influence du coefficient de flexion C_f

D'une façon plus générale, on utilisera la courbe de la chaînette verticale dans le cas de faibles coefficients de flexion (écart entre les courbes importants) et dans le cas de forts coefficients de flexion, on utilisera le tombé du fil avec une seule contrainte initiale.

P.BRUNIAUX - 83/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

II.2.3.3 Discussion sur les essais et leurs sensibilités :

Deux critères sont à prendre en compte pour l'identification des paramètres du modèle de fil : la distinction entre les paramètres de forme et les paramètres dynamiques, la notion de sous-modèle de comportement dynamique. Ce dernier critère est très important car il conduit à séparer les paramètres en différentes classes parmi lesquelles il nous est possible d'identifier les paramètres séparément et suivant des essais spécifiques.

L'essai relatif au tombé du fil sans contrainte semble le plus apte à répondre aux besoins d'identification des paramètres dynamiques. C'est d'abord un essai dynamique, et l'étude de la sensibilité des paramètres montre que les effets de masse et de viscosité ne sont pas contradictoires. Comme la masse d'un fil (\mathbf{m}_k ou m) est parfaitement définie par son titre, il nous a semblé judicieux de vérifier si un autre paramètre pouvait être identifiable par cet essai. Seul, le coefficient de flexion, parmi les paramètres de forme, peut engendrer une déformation perceptible dans le tombé du fil, démontré dans la sensibilité du test. Pour cela, ce test a été choisi pour identifier les paramètres de flexion C_f (en mode dynamique) et de viscosité du fil \mathbf{n}_k .

L'essai relatif au comportement en flexion d'un fil avec contraintes permet d'identifier aussi le coefficient de flexion C_{ν} (en mode statique). Nous avons mis en place cet essai afin de vérifier si la mesure du coefficient de flexion en dynamique est suffisante. Dans le cas contraire, une fonctionnelle (sous-modèle de flexion) doit être mise en place pour tenir compte d'éventuelles données dynamiques. La comparaison avec le précédent test contribue à cette analyse.

Les essais relatifs au comportement traction (sous-modèle de traction) contribue à l'identification des paramètres de traction en statique ou quasi-statique (K_r , K_v ou a,b,c,d,a,b,g) et dynamique (K_r). L'aspect dynamique est surtout traduit par la relaxation du tissu.

II.2.3.4 Identification des coefficients de flexion dynamique et de viscosité [P5]

II.2.3.4.1 Dispositif de mesure

Un dispositif spécifique de mesure a été mis en place pour ce test. Sommairement, il est composé d'un portique supportant la dynamique du fil, d'une caméra CCD monochrome et d'un logiciel de traitement d'images (cf. Figure II-32).

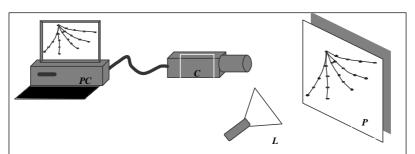


Figure II-32 : Schéma du dispositif de prise d'images

Ce dispositif permet de capturer la séquence d'images représentant le tombé d'un fil, de la traiter et d'identifier les paramètres de notre modèle de fil.

Au déclenchement de l'essai, la caméra C enregistre une séquence d'images du tombé du fil à des instants synchronisés par rapport à la vitesse d'obturation de celle-ci (24 images /sec). Lors de l'acquisition de ces images, celles-ci sont transmises à un ordinateur de type PC, lequel est chargé de les traiter successivement afin de déterminer la position de chaque fil issu du tombé. La caméra CCD fourni des images de 512x512 pixels en 256 niveaux de gris. Un logiciel de reconnaissance de forme a été conçu afin d'extraire l'information fil des différentes images de la séquence. Brièvement, ce logiciel analyse la qualité de l'éclairage, détecte la couleur (niveau de gris) du fil et déduit la longueur de celui-ci. Pour cela, une série de traitements appropriés est proposée tels que :

- le recadrage dynamique d'une partie de l'histogramme,
- la binarisation,
- l'étude inertielle,
- la redistribution des points caractéristiques.

II.2.3.4.2 Traitement des images

Nous présentons ici la méthode utilisée permettant de déterminer, à partir d'un ensemble d'images recueillies par la caméra, la matrice d'évolution des points caractéristiques du fil. Pour être cohérent avec le modèle, ces points doivent correspondre impérativement aux nœuds de celui-ci. L'intérêt de cette approche est que l'algorithme d'identification compare deux matrices de points et non plus deux images traduites par les pixels du tombé du fil. Il est important de rappeler que le but du dispositif de mesure est de permettre à l'algorithme d'identification de comparer le tombé réel du fil au tombé simulé, et d'orienter les paramètres du modèle de sorte que la discrétisation en nœuds de celui-ci coïncide avec les points caractéristiques. Ces points sont issus d'un découpage du fil en section linéaire représentant les barres joignant chaque nœud du modèle.

La Figure II-33 représente un échantillon des images issues d'une séquence d'images réelles. C'est à partir de cet exemple de base que nous allons développé la méthode d'extraction du fil.

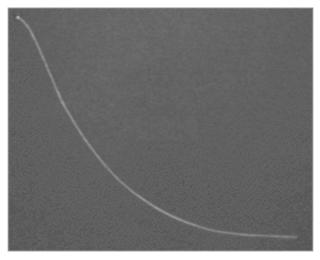


Figure II-33 : Une image lors du tombé du fil

Une pré-étude de l'histogramme de l'image de la Figure II-33 montre que l'objet fil ne peut pas être directement extrait par un simple seuillage, ce qui nous a amené à une suite de post-traitement avant le traitement principal. Le premier post-traitement consiste à découper l'image en différentes zones de forme rectangulaire (cf. Figure II-34), de travailler zone par

zone afin de résoudre les problèmes provoqués par la non-homogénéité de la lumière. Cette technique permet d'avoir un fond localement plus homogène et donc facilite le traitement principal. Ensuite, il a été nécessaire d'accentuer le contraste entre l'objet fîl et le fond par un recadrage dynamique. La troisième phase du post-traitement linéarise la courbure du fil dans chaque rectangle. Cela nécessite de définir un coefficient de linéarité \boldsymbol{a} proposé à la fin de cette section, orientant l'utilisateur sur le choix de la taille de ces rectangles.

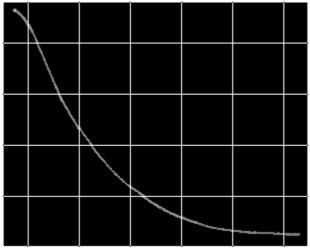
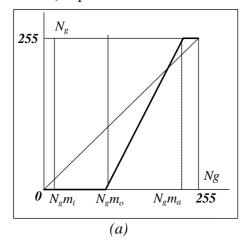


Figure II-34 : :Image découpée

Après cette procédure d'initialisation, nous commençons le traitement principal par une analyse de l'histogramme de chaque rectangle. Cette analyse montre qu'une première analyse peut être envisagée sur ces histogrammes afin d'extraire l'information fil de l'information fond.

Cette opération débute par un recadrage dynamique de chaque zone de l'image. Ce recadrage utilise une table de conversion ou LUT (Look Up Table) représentée en Figure II-35(a). La LUT est une fonction qui transforme un niveau de gris i en un niveau de gris j sans modification de la structure spatiale de l'image. $N_g m_i$, $N_g m_o$ et $N_g m_a$ désignent respectivement le niveau de gris minimum, moyen et maximum de la zone. Le critère de séparation est le suivant : tout pixel inférieur à $N_g m_o$ est considéré appartenant au fond, dans le cas contraire, le pixel est considéré comme pouvant appartenir à l'objet fil.



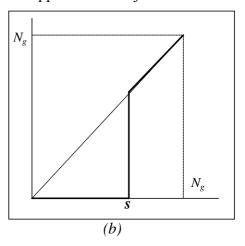


Figure II-35: (a) LUT de recadrage dynamique, (b) LUT de binarisation

Ensuite, une binarisation par un seuillage dynamique identifie l'appartenance d'un pixel à l'objet fil en lui affectant un niveau de gris 1 (le fond est affecté au niveau 0). Ce seuillage est réalisé à l'aide de la table de conversion de la Figure II-35(b). *s* est le seuil de binarisation correspondant au nouveau niveau de gris moyen de la zone.

La troisième phase de ce traitement d'images permet de réduire le volume d'informations dû à l'épaisseur du fil. Pour cela, il suffit de définir, pour chaque zone, un point caractéristique appartenant au fil. Le barycentre G des pixels (x_i, y_i) de la zone pondérés par leur niveau de gris m_i est le point le plus apte à caractériser chaque rectangle. G est identifié par les données suivantes :

$$\begin{cases} x_g = \frac{1}{M} \sum_i m_i x_i \\ y_g = \frac{1}{M} \sum_i m_i y_i \\ M = \sum_i m_i \end{cases}$$
 (II-57)

Pour s'assurer que le point G est bien représentatif de la zone, une étude inertielle est réalisée sur chaque zone (cf. Figure II-36). Cette étude permet de vérifier la rectitude de l'objet de la zone considérée. Pour cela, nous calculons la matrice d'inertie A de cette zone telle que :

$$A = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{21} & I_{22} \end{bmatrix}$$
 (II-58)

avec

$$\begin{cases}
I_{11} = \sum_{i} m_{i} (x_{G} - x_{i})^{2}, I_{12} = I_{21} = \sum_{i} m_{i} (x_{G} - x_{i}) (y_{g} - y_{i}) \\
I_{22} = \sum_{i} m_{i} (y_{G} - y_{i})^{2}
\end{cases}$$
(II-59)

A partir des valeurs propres I_1 et I_2 de la matrice A, le calcul du coefficient de linéarité a permet d'évaluer dans quelle mesure le nuage de pixels décrit une droite passant par G. Ce coefficient s'écrit :

$$\boldsymbol{a} = \frac{|\boldsymbol{I}_1 - \boldsymbol{I}_2|}{|\boldsymbol{I}_1 + \boldsymbol{I}_2|} \tag{II-60}$$

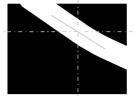


Figure II-36: Inertie d'un rectangle

Plus ce coefficient est proche de 1, meilleur est la répartition des pixels le long d'un segment de droite. Il est important de rappeler l'hypothèse de départ d'assimiler le fil dans chaque zone considérée à un segment de droite. Dans le cas contraire, un re-découpage de l'image en zones plus petites doit être envisagé.

La phase finale de traitement a pour but de re-découper la représentation du fil précédemment obtenue en autant de segments que de barres définies par le modèle de fil. Ainsi, à partir des points G et par extrapolation, le fil est ré-échantillonné en autant de points caractéristiques nécessaires pour sa comparaison au modèle. (cf. Figure II-37)

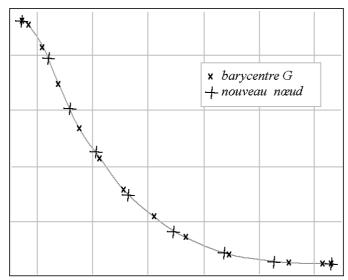


Figure II-37 : Re-découpage du fil.

L'étalonnage de l'image qui permet de passer des coordonnées graphiques (en pixel) aux coordonnées réelles (métriques) se fait en adaptant l'échelle de l'image à l'échelle de la scène. Pour cela, le logiciel mesure la longueur du fil déterminée en pixel et la compare à la longueur réelle du fil à l'état initial. Cette comparaison est possible car le fil ne s'allonge pas pendant ce test.

L'ensemble de la procédure de traitement d'images est répété sur chaque image du tombé de fil. La superposition de chacun de ces résultats permet d'obtenir la Figure II-38 sous la forme d'une matrice de points caractéristiques.

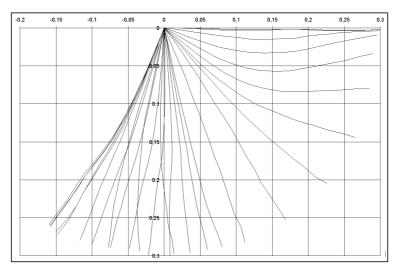


Figure II-38 : Tombé du fil réel

II.2.3.4.3 Algorithme d'identification

L'objectif de l'algorithme d'identification est de minimiser l'écart quadratique entre l'essai réel et l'essai simulé. Pour cela, il ajuste les paramètres du modèle afin de faire coïncider les

P.BRUNIAUX - 88/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

coordonnées des points du tombé réel (cf. Figure II-38) avec les coordonnées des points du tombé simulé (cf. Figure II-39).

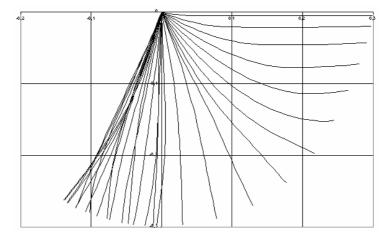


Figure II-39: Tombé d'un fil simulé

Compte tenu de nos travaux antérieurs [BRU88], l'algorithme d'identification utilise les méthodes de programmation non linéaire [RIC71] et en particulier une des méthodes du modèle proposée par Powell. Cet auteur a présenté deux méthodes d'évolutions des paramètres dans un espace multidimensionnel, leur but étant de minimiser une fonction de plusieurs variables en évitant le calcul de la dérivée. Dans ce cas, nous utilisons la deuxième méthode de Powell [POW64].

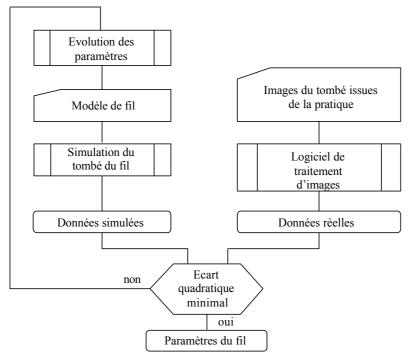


Figure II-40 : Principe de la méthode d'identification.

Le schéma de la Figure II-40 résume le principe général des méthodes de programmation non linéaire appliquées à notre étude. A l'état initial, nous simulons le tombé du fil par l'intermédiaire de son modèle mathématique. En parallèle, nous acquérons la matrice des points caractéristiques issue du précédent dispositif expérimental. A ce stade, il nous est possible de comparer les résultats simulés et réels du tombé. Nous en déduisons l'écart quadratique entre les données réelles et simulées. Deux cas peuvent se présenter. Dans le

P.BRUNIAUX - 89/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

premier cas, l'écart est important et nécessite d'ajuster les paramètres du modèle simulé. Nous relançons alors la simulation et la comparaison avec les résultats réels. Dans le second cas, l'écart est suffisamment petit, ce qui est équivalent à des images superposées. Nous considérons alors que la valeur des paramètres du modèle est correcte.

II.2.3.4.4 Résultats

Nous présentons ici quelques résultats obtenus sur 2 fils relativement différents. Le premier, utilisé pour un tissu de siége automobile, est un fil fibreux en polyester, de titre 830 dTex. Le second en Silionne enduit PVC est un mono filament de 970 dTex, utilisé pour les stores de grande taille. Leurs tombés réels respectifs sont en Figure II-41(a) et en Figure II-41(b). Ils ont été obtenus à l'aide de la séquence de traitement d'image présentée précédemment.

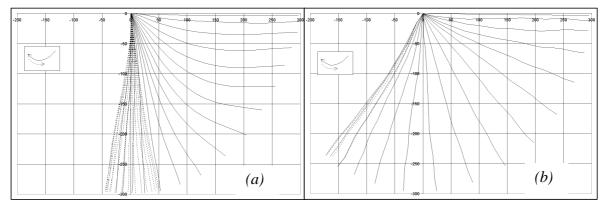


Figure II-41 : Tombé réel de 2 fils tests

L'analyse de ces données montre que le second fil est beaucoup plus raide que le premier. Cette observation se trouve conforter par les résultats d'identification. En effet, dans le Tableau 6, nous voyons que le module d'élasticité en flexion pour le second fil est bien plus élevé que pour le premier.

Fil	Coefficient de viscosité	Module de flexion
(a)	7.2 10 ⁻⁵	$C_f=2.2 \ 10^{-5}$
(b)	2,5 10 ⁻⁶	$C_f=1.9\ 10^{-1}$

Tableau 6 : Résultat sur les coefficient de viscosité et de flexion

La Figure II-42 présente les tombés simulés des deux fils testés. La coïncidence des tombés réels et des tombés simulés valide les premiers résultats d'identification.

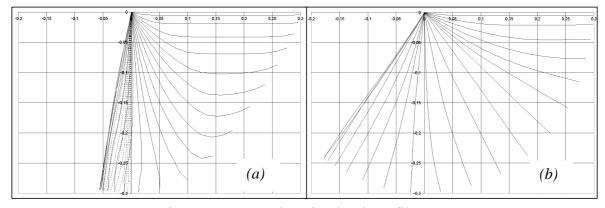


Figure II-42: Tombés simulés des 2 fils tests

II.2.3.5 Identification du coefficient de flexion statique [DEA12][P6]

L'identification du coefficient de flexion en statique a été réalisée par le test de dépassement. En pratique, nous avons respecté le seuil limite défini par l'étude de la sensibilité de ce paramètre (Cf. §II.3.3.2). Différentes expériences ont été réalisées. Le résultat présenté montre le comportement en flexion d'un fil de coton d'un titre de $15\ Tex$. L'expérience utilise le même dispositif expérimental présenté au précédent paragraphe sauf que le comportement du fil face au portique décrit la position limite de la chute d'un fil en flexion pure (Figure II-43(a)). Sur l'aspect traitement de l'image, nous ne reprenons que le post traitement. L'identification de ce paramètre appelé C_f s'effectue directement sur l'image pixélisée après une étalonnage de celle-ci. La méthode des moindres carrés est ensuite appliquée et donne, pour le fil considéré, le résultat suivant :

$$C_f = 1.91.10^{-4} \text{ N.rad}^{-1}$$

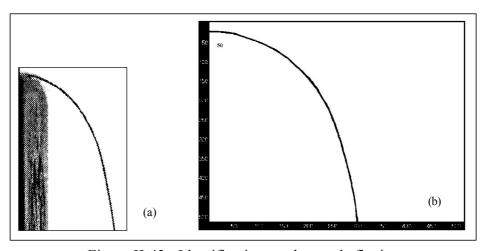


Figure II-43: Identification par le test de flexion

La comparaison entre le résultat réel de la Figure II-43(a)et le résultat simulé de la Figure II-43 (b) permet de valider la valeur du coefficient issu de l'identification.

II.2.3.6 Identification du sous modele de traction simplifié [DEA12][P6]

L'expérience consiste à évaluer le comportement en traction d'un fil traduit par le modèle énergétique. Les équations des forces intervenant dans l'énergie de traction sont les suivantes :

la force de rappel du ressort de la barre k :
$$\vec{F}_r = -K_r(l - l_0) \frac{\overrightarrow{M_k M_{k+1}}}{\|\overrightarrow{M_k M_{k+1}}\|}$$
 (II-61)

la force de réaction de l'amortisseur de la barre:
$$\vec{F}_{v} = -K_{v} \frac{\partial l}{\partial t} \frac{\overrightarrow{M_{k} M_{k+1}}}{\left\| \overrightarrow{M_{k} M_{k+1}} \right\|}$$
 (II-62)

Un programme de gestion a été écrit pour l'appareil de mesure Lhormagy afin de contrôler la montée en traction du fil. La linéarité de la courbe de la Figure II-44 montre que le fil utilisé ne présente pas de viscosité, il est purement élastique. L'identification conjointe des paramètres K_r et K_v par la méthode des moindres carrés confirme ce résultat, ainsi :

$$K_r = 0.31 \text{ N.mm}^{-1} \text{ et } K_v = 0 \text{ N.s.cm}^{-1}$$

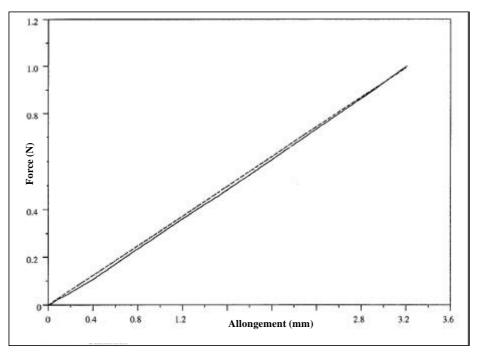


Figure II-44: Identification par le test de traction

II.2.3.7 Identification du sous modèle de traction complet [Th2][DEA10]

Dans ce cas de figure, il a été nécessaire d'identifier séparément les différents comportements dynamiques en traction, c'est-à-dire : le comportement en traction pure, le comportement en relaxation et le comportement en hystérésis. Un programme de gestion a été écrit pour l'appareil de contrôle de tension Lhormagy afin d'établir les différentes étapes de la traction du fil. Le logiciel d'identification CurveExpert a permis d'identifier nos paramètres. Ce logiciel permet d'intégrer un grand nombre de modèles linéaires et non-linéaires identifiés par interpolation.

L'équation régissant la montée en traction pure d'un fil est la suivante :

$$K(\mathbf{x}) = a + b\mathbf{x} + c.\sin(d.(\mathbf{x} - e)).e^{f(\mathbf{x} - e)}$$
(II-63)

Les figures Figure II-45 et Figure II-46 représente la traction pure à vitesse constante et faible de deux fils à comportement dynamique différente. Le faible écart entre les courbes expérimentales et théoriques valide le modèle proposé, ainsi que les résultats de l'identification.

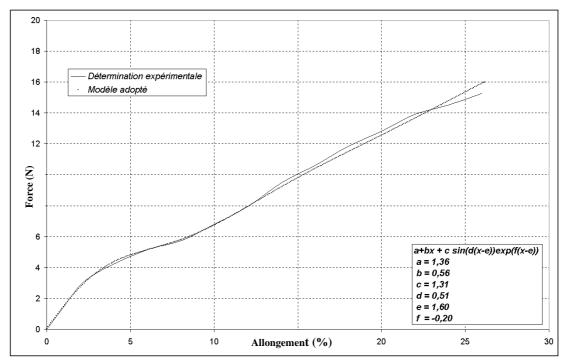


Figure II-45: Traction expérimentale et simulée du fil A2

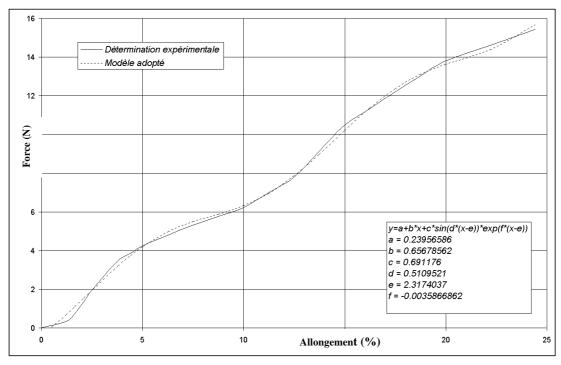


Figure II-46: Traction expérimentale et simulée du fil A1

L'équation traduisant les effets de relaxation d'un fil est la suivante :

$$V(\dot{\mathbf{x}},t) = Ae^{Bt} + Ce^{Dt} \tag{II-64}$$

Les figures Figure II-47 et Figure II-48 montre la diminution de la force de traction en fonction du temps de relaxation de l'éprouvette. Ce comportement a été testé à différents points initiaux de la courbe de traction, et ce pour les deux types de fil précédent. La nette superposition entre les courbes expérimentales et théoriques montre que le modèle utilisé

P.BRUNIAUX - 93/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

traduit parfaitement les effets de relaxation (exemple A1 : A=0.55, B=0.035, C=0.67, D=0.001 pour F=5.16N).

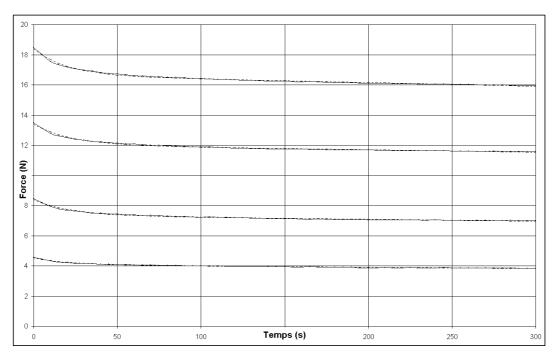


Figure II-47 : Relaxation expérimentale et simulée du fil A2

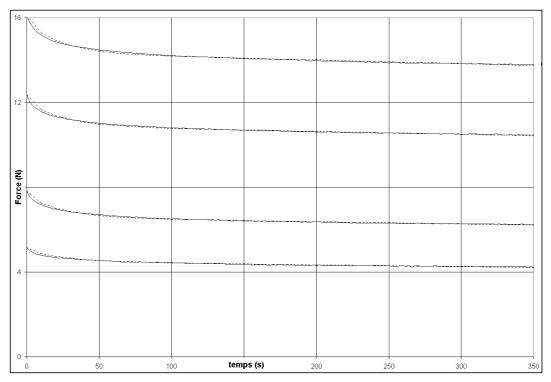


Figure II-48 : Relaxation expérimentale et simulée du fil A1

L'équation traduisant les effets de l'hystérésis d'un fil est la suivante :

$$F(\mathbf{x}) = e^{\mathbf{a}(\mathbf{x} - \mathbf{b})} - 1 \tag{II-65}$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{g} \ln(\mathbf{x}_1) + 1$$
 et $\mathbf{b} = \mathbf{x}_1 - \frac{1}{\mathbf{a}} \ln(F_1 - 1)$ (II-66)

Les figures Figure II-49 et Figure II-50 montre que le retour à l'état initial de traction n'est plus possible au delà d'une certaine limite. Il se traduit par des effets d'hystérésis et la conservation de l'état de déformation.. Ce comportement a été testé à différents points initiaux de la courbe de traction pour nos deux échantillons. Le rapprochement des courbes confirme que les paramètres identifiés associés au modèle de représentation traduit les effets d'hystérésis du fil (exemple A1 : a=0.91, β=1.40, ?=0.91 pour F₁=3N).

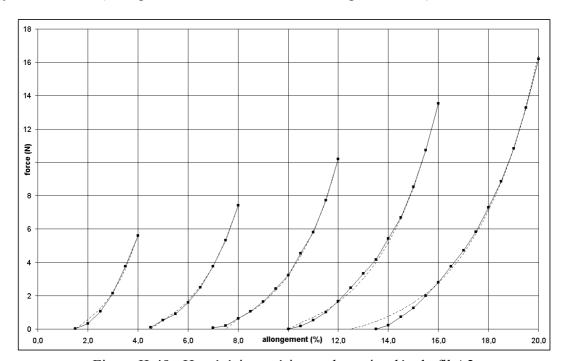


Figure II-49: Hystérésis expérimentale et simulée du fil A2

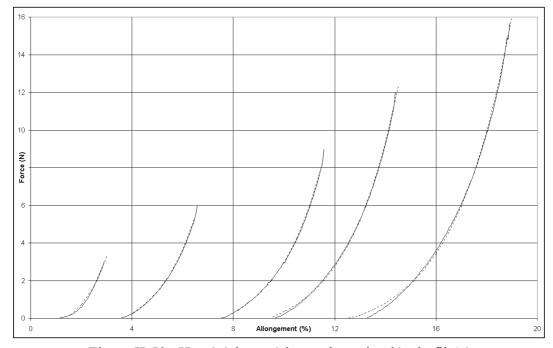


Figure II-50 : Hystérésis expérimentale et simulée du fil A1

II.2.4 Conclusion

Cette section traite de l'identification des paramètres d'un tissu. Pour cela, et selon l'application envisagée, deux pistes de travail ont été envisagées. En premier lieu, si le modèle est appliqué au TH, ce sont les paramètres du tissu lui même qui sont recherchés. Par contre, si le modèle est appliqué aux TuT, ce sont les paramètres du fil qui sont nécessaires.

Les premiers travaux d'identification ont été effectués par Adel Ghith [Th1]. L'objectif de cette thèse a été de mettre en place une «base de données tissu» paramétrée en fonction du modèle proposé. Pour cela, il a été nécessaire de concevoir des échantillons de tissus représentatifs de l'application et de définir une stratégie d'identification adaptée au monde du textile. La mise en place de tests spécifiques textiles a été très appréciée par l'industrie. Par ailleurs, le caractère linéaire du modèle n'a pas nécessité de méthodes d'identification particulières.

Pour les travaux de Xavier Legrand [Th2], la modélisation a nécessité un approfondissement utilisant des outils d'identification adaptés au modèle et à ses non linéarités. Le nombre important de paramètres à identifier a nécessité la partition de l'espace des paramètres en sous espace. Cela a permis de décomposer le modèle global en différents sous modèles. De plus, une étude fine sur la sensibilité des paramètres en fonction de la mesure a montré qu'il est important de séparer les paramètres liés aux petites déformations du tissu (paramètres de forme), des paramètres traduisant les grands déplacements de celui-ci (paramètres dynamiques). Différentes méthodes d'identification ont été utilisées en fonction des sous modèles à identifier. Dans certains cas, des développements et des tests spécifiques ont dû être mis en place, intégrant la programmation non linéaire.

Les deux stratégies utilisées possèdent toutefois quelques points communs qui ont marqué et orienté les travaux : ce sont les tests de traction, de flexion et de mesure du poids. Le schéma de la Figure II-3 laisse apparaître, quel que soit le modèle utilisé, d'autres paramètres tels que la traction et le cisaillement. Les comportements mécaniques associés à ces paramètres, négligés lors des travaux antérieurs, sont pris en compte dans la thèse en cours de Cyril Ngongoc [**Th3**]. Ils nécessiteront la mise en place de tests spécifiques.

II.3. SIMULATION

II.3.1 Introduction

Simuler une structure textile est une opération qui dépend fortement des objectifs fixés par l'application. Comme nous l'avons remarqué précédemment, travailler dans le domaine du TH nous amène à étudier soit le drapé d'un tissu sur un objet statique, soit le tombé d'un tissu sur un mannequin. Dans ce dernier cas, le mannequin peut être statique ou mobile. Par ailleurs, travailler dans le domaine des TuT conduit à simuler le tissu sous certaines contraintes techniques imposées par un cahier des charges très strict. Par exemple, dans le cas des structures tendues, des tractions importantes sur le tissu sont effectuées sous certaines contraintes, de même que des poinçonnements ponctuels. Aussi, nous avons bâti ce dernier chapitre en fonction des applications futures de nos modèles.

La première section étudie, dans un premier temps, le comportement dynamique d'un tissu évoluant dans un espace à trois dimensions. Une étude est menée sur la simulation du tombé en chute libre d'une nappe de tissu. L'objectif de ce travail est de se montrer les effets des petites déformations lors d'une dynamique. Aucune comparaison n'a pu être effectuée avec le monde réel de par la difficulté de mise en place d'une manipulation. La bibliographie montre qu'aucun auteur n'a pu comparer jusqu'alors des tests dynamiques simulés avec le monde réel. Seules quelques comparaisons qualitatives ont pu être effectuées [AMI89] [CHE95] [CHE96]. Dans un second temps, l'aspect statique du modèle est étudié. A la différence de l'étude précédente, il a été possible d'effectuer la comparaison entre la position statique finale simulée et la position statique finale réelle. L'observation de ces deux états permet d'estimer qualitativement les erreurs commises dans le processus de modélisation.

La seconde section est axée sur la simulation de tests (traction, poinçonnement) en rapport avec les futures applications industrielles (structures tendues, par exemple). Pour cela, le modèle de fil sera validé dans le contexte de Lagrange, tandis que le modèle de tissu sera validé dans le contexte PFD. En effet, par la méthode de Lagrange, il est possible de conditionner statiquement l'état initial d'une partie d'un fil ou de lui imposer une dynamique par le biais de contraintes adaptées, ce qui permet de d'envisager une trajectoire de commande [JON78]. Dans le cas du PFD, le temps de simulation des tissus de petite taille sont très important, voire prohibitif pour le secteur industriel [BAR98]. Il est donc nécessaire de développer des techniques de simulation spécifiques permettant de réduire les temps de calcul et d'éviter les problèmes de super-élasticité.

II.3.2 Simulation du modele TH [Th1][P3][P8]

II.3.2.1 Simulation du tissu par la méthode des éléments finis

Le processus d'approximation du comportement dynamique par la méthode des éléments finis doit suivre les étapes suivantes :

- L'objet (milieu continu) subit une discrétisation spatiale par un découplage en petites surfaces élémentaires dont la taille est choisie par l'utilisateur. Ces éléments sont interconnectés en un ensemble de points appelés nœuds. Les déplacements des noeuds sont les inconnues du problème.
- ➤ Un ensemble de fonctions est utilisé pour caractériser de manière unique l'évolution de chaque élément fini en terme de déplacements des nœuds. Dans notre cas, nous utilisons des systèmes d'équations différentielles (II-4).
- Les fonctions de déplacements définissent de manière unique l'état des contraintes dans les éléments finis. Ces contraintes ainsi que les contraintes initiales et les propriétés constitutives du matériau définissent l'état des tensions dans chaque élément.
- ➤ Un système de forces concentré aux nœuds et équilibrant les tensions pondérées et les distributions de poids est déterminé. Le résultat est une relation entre les matrices de rigidité et les forces extérieures.
- Le système devenu discret et linéaire doit finalement être échantillonné dans l'espace temporel afin de déterminer la solution du système à chaque pas de calcul.

Le synoptique de la Figure II-51 résume ces étapes.

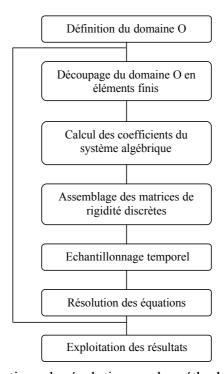


Figure II-51 : Synoptique de résolution par la méthode des éléments finis

II.3.2.2 Influence sur le comportement dynamique du système

La première série de résultats montre la simulation de l'évolution dynamique d'un tissu de dimension 1 m x 1 m lâché à partir d'une position initiale et évoluant en chute libre sans obstacle. L'élément fini adopté pour la discrétisation spatiale est de type triangulaire curviligne. Le découpage de la surface de 1 m² de tissu est constitué de 1248 éléments et 665 nœuds. La surface d'un élément fini représente environ $8.012x10^{-4}$ m². La simulation est arrêtée après un temps de 3s et est effectuée avec un pas de 0.05s.

La Figure II-52 fournit le résultat de la simulation de l'évolution d'un tissu dans un intervalle de temps de 0.4s. Au delà, le système est en équilibre. L'état d'équilibre fait l'objet d'une analyse plus fine dans le paragraphe suivant. Cette simulation a été effectuée avec les paramètres identifiés pour notre échantillon de référence (armure toile en coton-coton). L'ensemble des résultats relatifs aux différents échantillons conduisent à l'interprétation suivante:

Les déformations les plus significatives apparaissent au début du mouvement. Elles sont situées dans un intervalle de temps compris entre 0.2s et 0.4s. Au delà de ce temps, les déformations sont stabilisées car, dans ce cas, la masse du tissu génère un travail supérieur à celui des contraintes internes. Dès lors, l'influence des paramètres de déformations devient négligeable par rapport à l'influence des paramètres dynamiques.

Influence de l'armure sur la dynamique du système :

L'amplitude des déformations est faible, de l'ordre du millimètre. Toutefois, on observe qu'elle est plus importante pour le tissu à armure toile que pour le tissu à armure sergé ou satin. Seule la simulation permet de faire cette différenciation.

Pour les tissus à armures sergé ou satin, les déformations sont plus étalées dans le temps (transitoires plus longs) que pour le tissu à armure toile. Ceci peut être expliqué par le fait que les tissus à armures sergé ou satin sont plus souples que les tissus à armure toile. Ceci corrobore les résultats de l'identification qui ont montré que le tissu à armure toile est plus résistant à l'allongement qu'à la flexion (cf. § II.3.2.3 et II.3.2.5).

Influence du fil sur la dynamique du système :

Les résultats obtenus font apparaître que la nature du fil dans le sens chaîne ou dans le sens trame influe de manière sensible sur l'évolution dynamique des tissus. En effet, elle influe sur les différents coefficients mécaniques intervenant dans le modèle et modifie l'amplitude, la période et la durée de la phase transitoire du mouvement. De ce fait, chaque étude sur le drapé doit tenir compte non seulement de l'armure du tissu mais aussi de sa composition. Ainsi, une simple permutation des fils de chaîne et de trame peut modifier la dynamique du système.

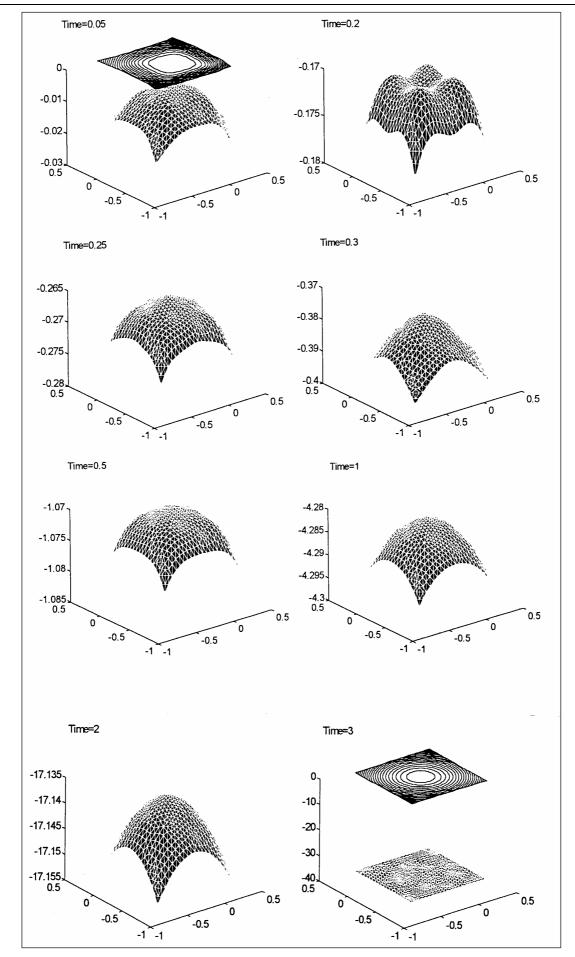


Figure II-52 : Résultats de simulation du tombé d'un tissu à différentes étapes

II.3.2.3 Influence sur la position d'équilibre du tissu

La deuxième série de résultats montre l'état d'équilibre d'un tissu. Celui-ci intervient à l'issue de la simulation dynamique d'un tissu de dimension 0.16 m x 0.16 m posé sur une plate-forme carrée de dimension 0.12 m x 0.12 m. Dans ce cas, nous n'étudions que la portion de tissu mise en mouvement par les forces gravitationnelles. L'élément fini adopté pour la discrétisation spatiale est de type triangulaire curviligne. Le découpage de la surface en mouvement est réalisé par 648 éléments et 400 nœuds. La surface d'un élément fini représente environ 1.72x10⁻⁵ m². Le pas de discrétisation temporelle est de 0.1s.

La Figure II-53 montre, dans la colonne centrale, les résultats de simulation relatifs aux échantillons présentés dans la section « identification » (cf. § II.3.2). Chaque essai simulé est accompagné de deux photos des coins les plus représentatifs de l'échantillon (colonnes latérales).

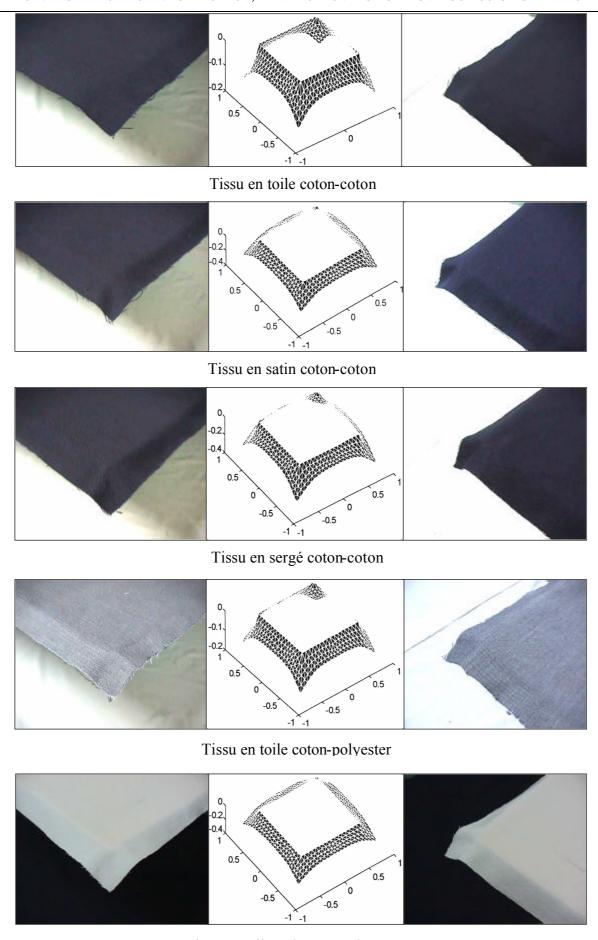
Les données significatives permettant de comparer les échantillons les uns par rapport aux autres et de comparer les essais simulés aux essais réels sont : le creusé du coin, la positon de la pointe du coin par rapport au niveau de la table, la flèche du tissu sur le côté.

Une analyse visuelle de la zone déformée apparaissant entre le coin de l'échantillon et le coin de la plate forme permet d'en caractériser la rigidité. Pour cela, deux vues sont utilisées. La première (colonne de gauche de la Figure II-53) est une vue de face de la zone déformée. La seconde (colonne de droite) est une vue de côté. Sur la vue de face, le contour de l'échantillon est creusé, tandis que sur la vue de côté il est galbé. Ce phénomène est d'autant plus prononcé que le tissu est souple. Ainsi, la ligne de contour adopte une courbure plus ou moins accentuée selon la rigidité du tissu. A partir de ces observations, nous pouvons classer les armure selon les rigidités décroissantes : toile, sergé, satin. Par ailleurs, le remplacement des fils de coton par des fils de polyester augmente la rigidité du tissu.

Cette analyse qualitative conforte les résultats de l'identification. En effet, les valeurs des modules d'élasticité w_{11}^1 , w_{22}^1 de l'armure toile sont supérieures à celles des armures sergé et satin. Il en résulte, pour cette armure, une plus grande résistance à la traction et une plus grande rigidité. De plus, la résistance à l'allongement du fil de polyester est bien plus importante que celle du fil de coton. Cela conduit à une plus grande rigidité du tissu conçu avec ce type de fil.

De même, les coefficients de résistance à la flexion w_{11}^2 , w_{22}^2 corroborent notre précédente analyse. En effet, nous avons effectivement observé que l'armure toile est nettement plus résistante à la flexion qu'une armure en sergé ou en satin. Entre le sergé et le satin, l'armure en sergé résiste mieux à la flexion que l'armure satin. Par contre, le remplacement du coton par du polyester donne moins de résistance à la flexion. Cela rend plus difficile l'interprétation quant à la rigidité. Dans ce cas, les effets induits par l'augmentation des modules d'élasticité w_{11}^1 , w_{22}^1 semblent compensés par les effets induit par l'augmentation des coefficients de résistance à la flexion w_{11}^2 , w_{22}^2 .

La comparaison entre les essais simulés et les essais pratiques montrent peu de différence. Il est important de préciser que le logiciel de simulation corrige automatiquement l'échelle des déformations (axe Z) afin de visualiser au mieux le phénomène. Aussi, lors de la comparaison des essais à armures différentes, l'échelle relative à l'écart entre la pointe du coin et le niveau de la plate-forme passe d'une variation de 0.2 à 0.4 décimètre lorsque que nous passons d'une armure toile à une armure sergé ou satin. Cette constatation a été vérifiée en pratique.



Tissu en toile polyester-polyester

Figure II-53 : Influence de l'armure et du fil en chaîne et trame sur sa position d'équilibre

P.BRUNIAUX - 102/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

II.3.2.4 Conclusion:

Les résultats obtenus montrent que le modèle retenu permet une description macroscopique du comportement dynamique des tissus textiles. A partir des différentes vues des échantillons en test et de la simulation du modèle, nous avons pu vérifier que le tissu simulé évolue vers un état d'équilibre proche de l'état d'équilibre obtenu en pratique. Par contre, le comportement transitoire n'a pas pu être comparé à la réalité. Rappelons qu'actuellement, il n'existe aucune expérimentation permettant de valider quantitativement un modèle de tissu, lors d'une phase transitoire. Seules les techniques de comparaison en mode statique sont pour le moment fiables et très utilisées en recherche industrielle et universitaire [AMI89] [CHE95] [CHE96]. Les variations de paramètres résultant des méthodes de fabrication des tissus ont été doublement vérifiées par l'identification des paramètres mécaniques du tissu et par les essais simulés. Nous avons constaté l'importance de l'armure d'un tissu ou de sa composition sur le comportement dynamique. Il est donc nécessaire de prendre en compte ce type de facteur lors d'une évolution d'un tissu dans l'espace, mais aussi lors de son état d'équilibre.

Par contre, nous sommes très critiques sur l'outil de simulation. Il semble que le choix de la forme de l'élément fini a aussi son importance. Le logiciel de simulation que nous avons utilisé nous contraint à un élément fini de type triangulaire. Il semble plus judicieux à l'avenir d'utiliser un élément rectangulaire afin de privilégier les directions chaîne et trame du tissu, notre matériau étant orthotrope.

II.3.3 Simulation du modèle TuT

II.3.3.1 Simulation d'un fil par le lagrangien [P6][DEA12]

Comme nous l'avons indiqué précédemment, un système de commande est nécessaire pour gérer les conditions initiales du fil en phase statique et dynamique. C'est par l'intermédiaire de contraintes extérieures définies en tant qu'entrées de commande que nous allons contrôler notre système. Pour cela, l'introduction de ces contraintes à l'aide des multiplicateurs de Lagrange dans le processus de modélisation mène à un système de commande non linéaire permettant de simuler divers comportements.

Type de contrainte	Equation associée
Holonome	$H_{j}(q)=0$
Unilatérale	$U_{j}(q) \ge 0$
Cinématique	$C_{j}(q).\dot{q}+d_{j}(q)=0$

Tableau 7 : Type de contraintes

Dans le cas du fil, un ensemble d'équations de contraintes peut être imposé à son mouvement. Selon leurs types, les contraintes peuvent avoir des expressions différentes (Tableau 7). La mise en place de différentes simulations du fil sous diverse contraintes a permis de valider le modèle de commande et son environnement.

II.3.3.1.1 Simulation Numérique du système par dynamique inverse

Dans le cas considéré, notre système composé d'équations de type DAE (Equation Algébrique Différentielle) comprend les équations propres au système et les équations de contraintes

[BRE96][HAI89]. Les variables inconnues sont les variables systèmes et les entrées de commande nécessaires pour exécuter le mouvement indiqué. Aussi, nous devons utiliser une approche de type dynamique inverse pour engendrer un mouvement.

Une approche analytique pour simuler cette commande non linéaire mène à une complexité prohibitive. Pour cette raison l'utilisation de méthodes numériques spécifiques est exigée.

L'approche pour résoudre directement le système de DAE a été basée sur le travail de ODE "raide" [GEA71][GEA85]. De cette étude, plusieurs codes ont été développés comme DASSL [PET82]. L'idée est de remplacer la dérivée par une approximation, et de résoudre ensuite l'équation résultante en utilisant la méthode de Newton. Par cette approche, nous avons obtenu la simulation du système.

II.3.3.1.2 Evaluation et Résultats

Le calcul des dérivées est un problème qui concernent les méthodes numériques. Les systèmes de calcul symbolique comme Mupad évitent une tel problème grâce à l'utilisation d'opérations symboliques telles que la différentiation automatique. L'approche symbolique est une aide pour notre problème parce qu'elle nous permet d'exécuter des calculs exacts comme les opérations de dérivation partielle. De plus, les calculs numériques peuvent être optimisés en stockant toutes les expressions redondantes superflues dans des variables auxiliaires et le développement est aussi beaucoup plus rapide en utilisant une programmation modulaire.

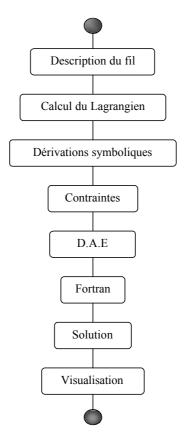


Figure II-54: Procédure de simulation

Une fois les opérations symboliques exécutées, le résultat doit être numériquement évalué. Afin de transférer l'objet symbolique à notre environnement numérique, il a été développé un programme qui génère le sous-programme Fortran d'un DAE décrivant le comportement du fil. Puis, suivant la complexité du système algébro-différentiel, des routines Fortran ont été

mise en place pour résoudre ce DAE. L'environnement, qui a été développé, est décrit en Figure II-54

II.3.3.1.3 Simulations [27]

Plusieurs simulations ont été effectuées avec ou sans contraintes afin d'évaluer notre modèle (cf. § II .1.3.3), sous différentes conditions de fonctionnement. Les paramètres communs des différentes simulations sont les suivants :

$$n = 16$$
, $l_0 = 0.625^{-1}.10^{-2} m$
 $m = 15.10^{-7} kg$
 $K_r = 0.5 N.cm^{-1}$, $K_v = 5 N.s.cm^{-1}$
 $C_b = 0.1.10^{-4} N.rad^{-1}$, $C_v = 1.82.10^{-5} N.s.cm^{-1}$

Application sans contrainte

Les premières résultats de simulation sont relatifs au tombé du fil (Figure II-55). L'objectif est de comparer le modèle de fil développé par la méthode de Lagrange et celui développé par le PFD (cf. § II.1.3.1). La concordance des résultats a permis de valider cette approche de modélisation et de démontrer aussi la rapidité de la simulation par la méthode de Lagrange.

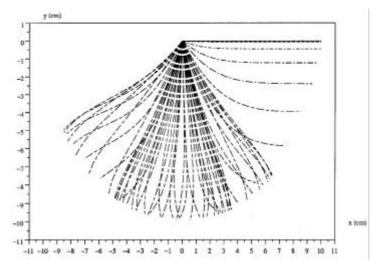


Figure II-55 : Simulation du tombé d'un fil sans contrainte

Applications avec contraintes

Exemple de contrainte géométrique ponctuel : Le positionnement de l'extrémité du fil à un endroit donné O_n se traduit par les conditions $x_n(t) = cte$ et $y_n(t) = cte$, $\forall t$. Ce sont des contraintes holonomes, il est alors nécessaire de dériver ces équations pour obtenir respectivement les équations H_{1i} et H_{2i} , $i \in [1,n]$.

Considérons

$$x_n(t) = \sum_{i=1}^{n} l_i(t).\sin(\mathbf{q}_i(t))$$
 (II-67)

$$y_n(t) = \sum_{i=1}^{n} l_i(t) \cdot \cos(\mathbf{q}_i(t))$$
 (II-68)

dans le cadre de la théorie générale du formalisme de Lagrange, nous obtenons :

$$H_{ii}(\boldsymbol{q}_i) = l_i(t).\cos(\boldsymbol{q}_i(t)) \tag{II-69}$$

$$H_{ii}(l_i) = l_i(t).\sin(\boldsymbol{q}_i(t)) \tag{II-70}$$

$$H_{i}(\boldsymbol{q}_{i}) = -l_{i}(t).\sin(\boldsymbol{q}_{i}(t)) \tag{II-71}$$

$$H_{\gamma_i}(l_i) = l_i(t).\cos(\boldsymbol{q}_i(t)) \tag{II-72}$$

$$g_1 = \sum_{i=1}^{n} \dot{l}_i(t) \cdot \sin(\mathbf{q}_i(t)) + \dot{\mathbf{q}}_i(t) \cdot l_i(t) \cdot \cos(\mathbf{q}_i(t))$$
(II-73)

$$g_2 = \sum_{i=1}^{n} -\dot{l}_i(t).\cos(\mathbf{q}_i(t)) + \dot{\mathbf{q}}_i(t).l_i(t).\sin(\mathbf{q}_i(t))$$
(II-74)

La Figure II-56 représente la simulation d'un fil dans cette configuration. Ce fil est dans un état d'équilibre sans énergie (forme V) et tend vers sa position énergétique minimale (forme U).

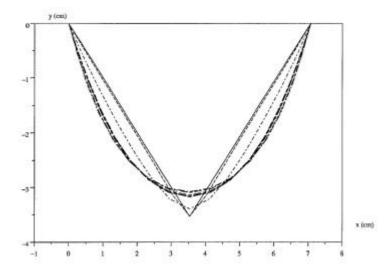


Figure II-56: Simulation d'un fil avec contrainte géométrique ponctuelle

Exemple de contrainte géométrique linéaire: Si nous souhaitons maintenant fixer une barre (un élément du fil), la contrainte holonome pour cette barre est écrite comme suit : $q_1(t) = cte$, $\forall t$. Nous devons rajouter alors les équations ci-dessous :

$$H_{3j} = 1, j = i$$
 (II-75)

$$H_{3j} = 0, j \neq i$$
 (II-76)

$$g_3 = \dot{\boldsymbol{q}}_i(t) \tag{II-77}$$

La Figure II-57 montre un exemple d'une telle contrainte pour une chute de fil conditionnée par les deux premières barres fixées à l'horizontale.

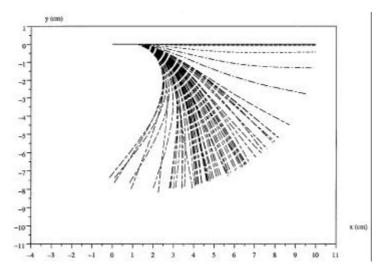


Figure II-57 : Simulation d'un fil avec contrainte géométrique linéaire

Pour cette simulation, le paramètre de flexion est plus grand (10 ⁻⁴ N.rad ⁻¹) afin d'accentuer le comportement en flexion du fil.

Exemple de contrainte cinématique: Si l'on souhaite déplacer l'extrémité du fil horizontalement, la contrainte devient $\dot{x}_n(t) = cte$ et $\dot{y}_n(t) = cte$.

$$\dot{x}_{n} = \sum_{i=1}^{n} \dot{l}_{i}(t) . l_{i}(t) . \sin(\mathbf{q}_{i}(t)) + \dot{\mathbf{q}}_{i}(t) . l_{i}(t) . \cos(\mathbf{q}_{i}(t))$$
(II-78)

$$\dot{y}_{n} = \sum_{i=1}^{n} \dot{l}_{i}(t) \cdot l_{i}(t) \cdot \cos(\mathbf{q}_{i}(t)) - \dot{\mathbf{q}}_{i}(t) \cdot l_{i}(t) \cdot \sin(\mathbf{q}_{i}(t))$$
(II-79)

Cela se traduit par les équations de contrainte suivantes :

$$G_{i}(\boldsymbol{q}_{i}) = l_{i}(t).\cos(\boldsymbol{q}_{i}(t)) \tag{II-80}$$

$$G_{i,i}(l_i) = l_i(t).\sin(\mathbf{q}_i(t)) \tag{II-81}$$

$$G_{i}(\boldsymbol{q}_{i}) = -l_{i}(t).\sin(\boldsymbol{q}_{i}(t)) \tag{II-82}$$

$$G_{i}(l_{i}) = l_{i}(t).\cos(\boldsymbol{q}_{i}(t)) \tag{II-83}$$

$$G_1 v = \dot{x}_n - cte = 0 \tag{II-84}$$

$$G_2 v = \dot{y}_n - cte = 0 \tag{II-85}$$

La Figure II-58 illustre une traction du fil avec une contrainte de vitesse de $\dot{x}_n = 2.26$ cm.s ⁻¹.

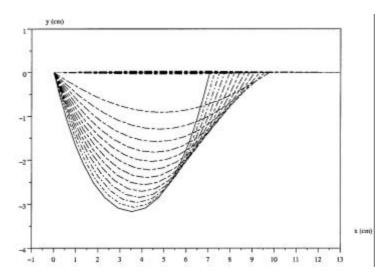


Figure II-58: Simulation d'un fil avec contraintes cinématiques

II.3.3.1.4 Conclusion

C'est à partir de la théorie générale du formalisme de Lagrange que nous avons pu développer la partie commande de notre système. Par cette approche, le comportement dynamique d'un fil soumis à diverses situations ou contraintes, qu'elles soient statiques ou dynamiques, est envisageable. C'est par l'intermédiaire de travaux analytiques et numériques qu'il a été possible de mettre en place un environnement de développement de type symbolique/numérique. Par un procédé de calcul à dynamique inverse, simuler un fil revient alors à calculer la force de commande requise pour exécuter des contraintes imposées. Les résultats de simulation sont en accord avec des essais expérimentaux similaires.

Par comparaison avec le modèle de fil utilisant le PFD, nous avons pu remarquer que ce modèle conduit à des résultats de simulation très proches. Les points forts qui lui sont accordés sont les suivants :

- vitesse de calcul beaucoup plus grande (multipliée par 200),
- > souplesse d'utilisation : en effet, le fait d'avoir favorisé une approche scindant la mise en équations du problème de sa résolution permet de réutiliser facilement les composants spécifiques à chaque partie. Ceci permet un passage plus aisé à la modélisation du tissu et à sa simulation. De plus, cette méthode génère automatiquement les équations du mouvement à partir de la description géométrique du système et des énergies mises en jeu,
- ➤ prise en compte directe des contraintes: celles-ci sont intégrées directement dans les équations du modèle et donc leur obtention n'est pas évaluées de manière indirecte comme c'est le cas avec les méthodes utilisant le PFD.

II.3.3.2 Simulation d'un tissu par le PFD [Th2][P7] [28]

Le système d'équations ci-après doit être résolu pour chaque nœud $N_{i,j}$. Aussi, dans une première étape, nous présentons brièvement la résolution numérique utilisée pour un nœud. Puis, nous donnons ensuite les techniques de propagation et d'optimisation du temps de calcul (méthode des rangs, méthode multi-échantillonnée), de contrôle des effets de super-élasticité (méthode prédictive).

$$\begin{cases} \mathbf{m}_{i,j} \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_{i,j}}{\partial t^2} + \mathbf{n}_{i,j} \frac{\partial \vec{u}_{i,j}}{\partial t} = \vec{H}(\vec{u}_{i,j}) + \vec{R} \\ \\ \vec{R} = \mathbf{m}_{i,jC} \cdot \vec{g} + \mathbf{m}_{i,jT} \cdot \vec{g} + \vec{F}_{ext,C} + \vec{F}_{ext,T} + \vec{F}_{enc.} \\ \\ \vec{H}(\vec{u}_{i,j}) = \vec{F}_{tr;i,j;i,j-1C} + \vec{F}_{tr;i,j;i,j+1C} + \vec{F}_{tr;i,j;i,j-1T} + \vec{F}_{tr;i,j;i,j+1T} + \vec{F}_{fl;i,jC} + \vec{F}_{fl;i,jT} \end{cases}$$

II.3.3.2.1 Simulation par euler modifié

La méthode numérique qui a été employée pour résoudre les équations régissant la dynamique de chaque nœud est la méthode d'Euler modifiée basée sur la méthode d'intégration du trapèze.

Un nœud N, de masse μ , soumis à une contrainte R est régi par le vecteur d'état (P, V, \dot{V}) . A l'instant nTe, les forces de contrainte s'écrivent :

$$R = \sum F_k(nTe) \tag{II-86}$$

La première équation du système (II-34) peut être remplacée par :

$$\mathbf{m}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}(nT_e) + \mathbf{n}.\frac{\partial P}{\partial t}(nT_e) = R \tag{II-87}$$

dans laquelle:

$$\frac{\partial P}{\partial t}(nT_e) = V(nT_e) \tag{II-88}$$

et

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}(nT_e) = \frac{\partial V}{\partial t}(nT_e) = \dot{V}(nT_e) \tag{II-89}$$

L'équation (II-87) devient :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{\mathbf{m}} \cdot (R - \mathbf{n} \cdot V) \tag{II-90}$$

L'application directe de la méthode d'intégration, à l'instant (n+1)Te, se traduit par le vecteur d'état suivant :

$$P_{(n+1)Te} = \frac{P_{(n+1)Te} + P_{nTe}}{2} Te + P_{nTe}$$
 (II-91)

$$V_{(n+1)Te} = \frac{\dot{V}_{(n+1)Te} + \dot{V}_{nTe}}{2} Te + V_{nTe}$$
 (II-92)

$$\dot{V}_{(n+1)Te} = \frac{1}{m} (R - n \cdot V_{(n+1)Te})$$
 (II-93)

La fusion des expressions (II-92) (II-93) nous amène à :

$$\dot{V}_{(n+1)Te} = \frac{1}{\mathbf{m}} \cdot (R - \mathbf{n} \cdot \frac{\dot{V}_{(n+1)Te} + \dot{V}_{nTe}}{2} \cdot Te - \mathbf{n} \cdot V_{nTe})$$
(II-94)

ou encore:

$$\dot{V}_{(n+1)Te} = \frac{2R - \mathbf{n} \dot{V}_{nTe} Te - 2\mathbf{n} V_{nTe}}{2\mathbf{m} + \mathbf{n} Te}$$
(II-95)

En conclusion, le modèle dynamique d'un nœud est simulé par le système d'équations (II-91) (II-92)(II-96).

II.3.3.2.2 Optimisation par la méthode des rangs [26]

Bien que la méthode de résolution précédente semble la méthode réalisant le meilleur compromis entre temps de calcul et précision, la valeur de *te* conduit à des temps de calcul apparaissant comme excessifs. Il était donc important d'améliorer la vitesse de convergence vers la position d'équilibre dynamique de la structure tissu soumise à des sollicitations.

La première amélioration envisagée pour accélérer les algorithmes de calcul résulte d'une analyse au niveau du fil du phénomène de déformation de la structure tissu. En effet, nous avons constaté qu'un nœud élémentaire n'est susceptible d'avoir un déplacement non nul que si l'un de ses quatre voisins a un déplacement non nul. Réciproquement, un nœud élémentaire à déplacement nul n'entraînera pas un déplacement non nul pour l'un de ses voisins. A partir de cette observation, il est possible d'optimiser l'algorithme de balayage de la structure tissu. En effet, on peut classer les nœuds élémentaires les uns par rapport aux autres. Pour cela, un rang leur est attribué. Ce rang, affecté à un nœud donné, est déterminé par la distance séparant ce nœud du nœud sollicité le plus proche. Le rang d'un nœud dépend donc, selon une connexité 4, du rang de ses quatre voisins. Le calcul de distance se fait par une norme d'ordre 1. La valeur du rang est d'autant plus faible que le nœud est proche des sollicitations exercées sur la structure. Elle est nulle si le nœud est un nœud fixe de la structure (encastrement). En prenant l'exemple de la Figure II-59, dans laquelle la structure est soumise à une traction, les nœuds de $M_{1,1}$ à $M_{1,6}$ sont encastrés (donc affectés d'un rang nul) et les nœuds $M_{6,1}$ à $M_{6,3}$, sont sollicités (ils sont affectés d'un rang unitaire).

Lors du calcul de la déformation dynamique du tissu sous contrainte, la propagation se fait en tenant compte du rang du nœud considéré. Il semble logique de commencer par le calcul des nouvelles positions des nœuds de rang 2 immédiatement voisins de nœuds sollicités, avant de calculer celles des nœuds de rang plus élevés (plus éloignés des sollicitations). Ainsi, les nœuds $M_{5,1}$, $M_{5,2}$, $M_{5,3}$, $M_{6,4}$ de rang 2 (cf. Figure II-59) sont à calculer avant les nœuds de rang 3 : nœuds $M_{4,1}$, $M_{4,2}$, $M_{4,3}$, $M_{5,4}$, $M_{6,5}$.

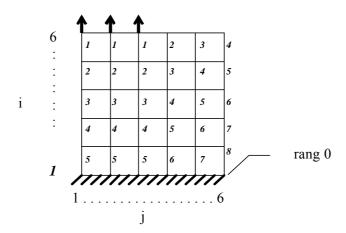


Figure II-59 : Exemple de la méthode des rangs

Ceci a permis d'optimiser le calcul de la propagation de l'onde mécanique sur l'ensemble de la structure. Ce principe évite, en effet, les calculs inutiles d'un balayage systématique de l'ensemble de la structure, coûteux en temps de calcul. De plus, cette solution garantit une bonne propagation des phénomènes dans le tissu.

II.3.3.2.3 Simulation par méthode multi-échantillonnée [26]

La deuxième amélioration résulte de la stratégie d'approche du problème. En effet, le tissu, pour cette modélisation, est considéré comme un entrecroisement de fils. Cela se traduit par un changement d'échelle fil/tissu : une géométrie spatiale de type surfacique est donc associée au tissu et une géométrie spatiale de type 3D est associée au fil. Dans ces conditions, il apparaît logique de considérer, de la même façon, deux échelles de temps : une échelle tissu pour décrire les phénomènes lents (sollicitations extérieures : traction à vitesse basse V sur le tissu) et une échelle fil pour décrire les phénomènes rapides (onde mécanique : propagation à vitesse élevée v de la sollicitation par le fil). Cela se traduit par l'adoption de deux périodes d'échantillonnage.

La période Te concerne le tissu et permet la visualisation et la commande du phénomène étudié (observation macroscopique). La période te concerne le fil et permet d'observer la propagation de l'onde mécanique, elle est en relation directe avec une observation microscopique de la structure tissu. On a donc : Te >> te. Pour des commodités (évidentes) de calcul, Te est choisie telle que Te = Nte, N étant un entier.

La mise en place de cette technique amène à diviser l'échelle des temps en périodes Te et à subdiviser chaque période Te en N périodes te. (cf. Figure II-60) On parle alors de multi-échantillonnage.

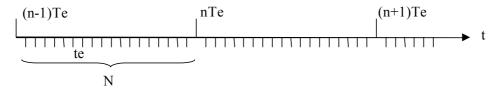


Figure II-60 : Le multi-échantillonnage

Les efforts extérieurs à la structure tissu et les effets d'inertie sont alors considérés comme constants le long de chaque période *Te*. A chaque *te*, l'équilibre dynamique de chacun des nœuds élémentaires est déterminé.

P.BRUNIAUX - 111/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

Les résultats montrent que la structure converge vers sa position d'équilibre dynamique en un nombre N' de période te tel que N' << N. Dès que la structure a atteint son état d'équilibre dynamique, il est possible de passer à la période Te suivante comme schématisé sur la Figure II-61. Cet artifice de calcul est auto-adaptatif.

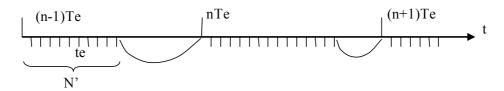


Figure II-61 : Le multi-échantillonnage modifié

Par cette technique, le temps de calcul pour (*N-N'*) périodes *te* est économisé à chaque étape de calcul *Te*.

II.3.3.2.4 Simulation par méthode prédictive [26]

Les approximations de calcul et la propagation des erreurs numériques font apparaître un phénomène assimilable à un problème de super-élasticité [PRO97]. La super-élasticité se caractérise par une élasticité linéaire pour les grandes déformations et conduit à la concentration des déformations dans des zones réduites. Ce problème oblige à diminuer N, augmentant alors le temps de calcul.

En posant comme hypothèse que la rigidité est partout identique, il est possible de « répartir » la déformation due aux contraintes externes sur chaque nœud en fonction de son rang. Nous faisons donc l'hypothèse qu'un fil peut être considéré comme homogène sur toute sa longueur. Ainsi, un effort à l'extrémité d'un fil se répartit de manière équilibrée sur l'ensemble du fil, conformément aux lois de la Résistance des Matériaux (matériau isotrope). En fait, cette hypothèse permet une approximation qui se corrige par les itérations successives du calcul du mouvement de chaque nœud.

Soit un fil de section cylindrique S dont le rayon est faible par rapport à la longueur (cf. Figure II-62).

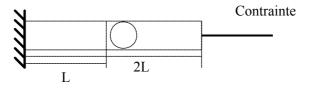


Figure II-62 : fil avant déformation

Sous contrainte, le fil s'allonge de 2X. (cf. Figure II-63).

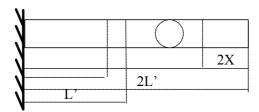


Figure II-63: fil après déformation

Soit:

u(x): déplacement du point M d'abscisse x,

e(x): déformation du point M d'abscisse x,

on a:
$$e(x) = \frac{du}{dx} = \frac{X}{L}$$

d'où:
$$u(x) = x \frac{X}{L}$$

$$pour x=0, u(0)=0$$

pour
$$x=2L$$
, $u(2L)=2X$

et pour M à l'abscisse
$$L(x=L)$$
, $u(L)=X$

Ce résultat est très simplement transposable sur le modèle de tissu, Par exemple, suite au déplacement X des nœuds $N_{5,1}$ à $N_{5,5}$ de l'échantillon de tissu de la Figure II-64, il est possible de faire la prédiction suivante :

les nœuds $N_{I,I}$ à $N_{I,5}$ se déplacent de $\frac{1}{5}X$,

les nœuds $N_{2,1}$ à $N_{2,5}$ se déplacent de $\frac{2}{5}X$,

les nœuds $N_{3,I}$ à $N_{3,5}$ se déplacent de $\frac{3}{5}X$,

les nœuds $N_{4,1}$ à $N_{4,5}$ se déplacent de $\frac{4}{5}X$.

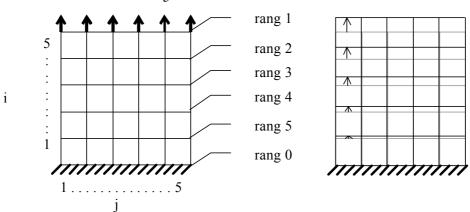


Figure II-64 : Prédiction des déplacements sur un tissu

Comme le montre la Figure II-65, nous appliquons la prédiction à chaque période **Te**. L'erreur de prédiction est corrigée par notre algorithme de calcul sur les périodes **te**.

Cette première approximation s'est avérée très efficace, réduisant énormément le temps de calcul et contribuant fortement à la propagation de la déformation dans la structure tissu. Il est important de noter qu'affecter la prédiction aux nœuds élémentaires du tissu permet d'atteindre plus rapidement l'état d'équilibre dynamique de la structure.

Etant donné que l'algorithme de calcul diminue fortement l'erreur de prédiction, il est possible, les contraintes étant continûment appliquées, de considérer comme prédiction du déplacement au temps t+Te, le déplacement calculé pour l'instant t.

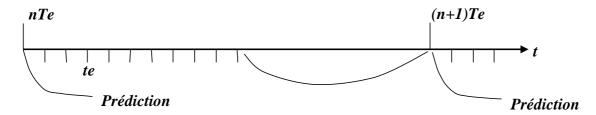


Figure II-65 : Application de la prédiction

Les Figures qui suivent permettent de comparer la convergence d'un nœud vers trois positions d'équilibre successives dans trois cas suivants : la Figure II-66 est sans prédiction, la Figure II-67 est avec prédiction mais sans tenir compte de la correction, la Figure II-68 est avec prédiction en tenant compte de la correction.

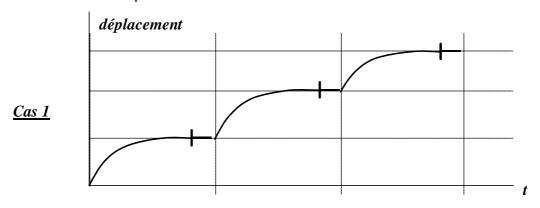


Figure II-66 : Pas de prédiction

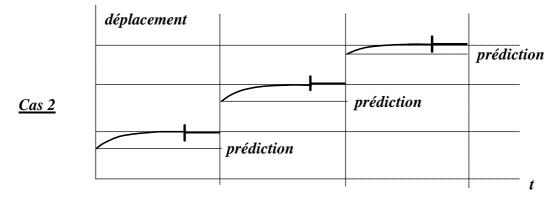


Figure II-67: Prédictions

P.BRUNIAUX - 114/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

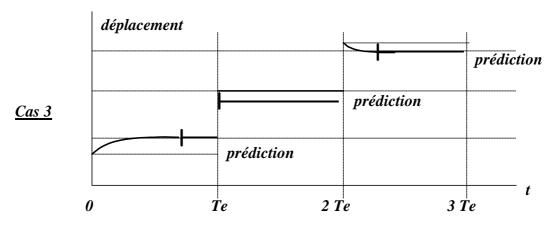


Figure II-68 : Prédictions corrigées

Le troisième déplacement a été choisi volontairement un peu plus faible que les deux premiers. Ceci permet de valider l'adaptabilité de la technique de calcul. Quelle que soit l'erreur commise dans la prédiction, l'algorithme fait converger la structure vers la position d'équilibre dynamique.

De t=0 à t=Te, la prédiction permet dans les cas 2 et 3 de converger plus rapidement que dans le cas 1 vers la position d'équilibre dynamique de la structure. De t=Te à t=2Te, le cas 3 évite tout calcul alors que le cas 2, bien que plus rapide que le cas 1, en nécessite. La période de t=2Te à t=3Te permet de voir que le cas 3 corrige les erreurs de prédiction.

Par cette amélioration, les temps de simulation sont divisés par un facteur 100 entre le cas et le cas 3.

II.3.3.2.5 Résultats de simulation en traction du tissu

Le modèle a été validé par des tests de traction simple à vitesse constante. Le tissu testé est maintenu entre les deux mâchoires d'un dynamomètre. L'une est fixe par rapport au bâti du dynamomètre, l'autre est animée d'un mouvement de translation à vitesse constante, et ce, jusqu'à rupture. En test réel, la rupture est constatée dès qu'un fil du tissu est rompu. Pour les tests simulés, on considère que le tissu ne peut pas s'allonger plus que l'allongement de rupture constaté lors des tests réels.

Le choix de la vitesse de traction a été choisi à 10 mm/min. Les dimensions des éprouvettes sont, pour les tests réels comme pour les tests simulés, conformes à la Norme NF [AFN75]. Elles sont de 200 mm en longueur et de 50 mm en largeur.

Tissu de siège automobile A1 (armure toile)

La Figure II-69 superpose les courbes de traction réelle et de traction simulée. On peut distinguer trois zones de comparaison sur cette figure.

De 0% à 3% d'allongement, le modèle a quelque difficulté à se rapprocher parfaitement de la réalité. Cette faible erreur est due à la pré-tension du fil présente dans le tissu réel, cette pré-tension n'étant pas accessible à la mesure et donc ne pouvant pas être prise en compte dans la simulation. De 3 % à 11% d'allongement, le modèle traduit correctement la réalité. Au delà de 11% d'allongement, le modèle n'intégrant pas les phénomènes de frottement/glissement entre fibres, il se produit une accumulation d'erreur qui se traduit par un écart important jusqu'à la rupture réelle du fil. Il est important de préciser que le domaine d'utilisation de ce tissu se situe au dessous de 11% ce qui conforte notre hypothèse simplificatrice.

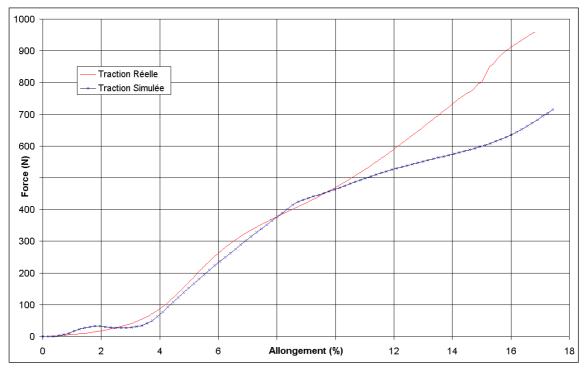


Figure II-69: Traction du tissu A1

Tissu de store St (armure cannelé 2-2)

Tout d'abord, il est important de rappeler que le tissu *St* est un tissu composé de mono filaments en Silionne enduit PVC. Cette enduction filamentaire a été fixée par calandrage. Aussi, tout mouvement entre la chaîne et la trame ne peut se faire qu'après rupture du liage résultant de l'enduction.

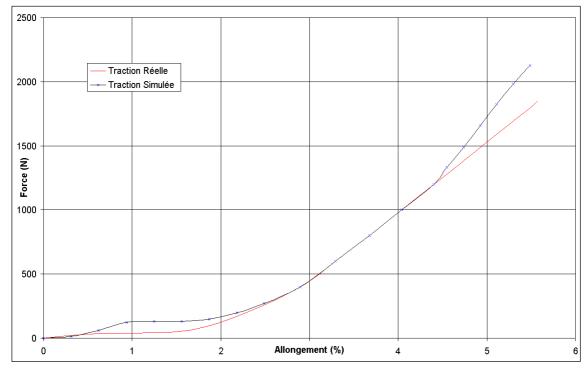


Figure II-70: Traction du tissu St

P.BRUNIAUX - 116/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

La comparaison des courbes de traction réelle et de traction simulée du tissu *St* est donnée Figure II-70. Comme précédemment, il est possible de faire apparaître trois zones sur cette figure. Dans la première, de 0% à 2% d'allongement, la non prise en compte de la pré-tension du fil dans la structure simulée engendre une erreur observable. De 2% à 4,5% le modèle est fidèle à la réalité. Au delà jusqu'à la rupture, le modèle se détache de la réalité car les fils dans la structure simulée se mettent à pivoter au niveau de chaque point de croisure. Ce phénomène n'est pas observable lors des tests réels car la chaîne reste perpendiculaire à la trame. Nous nous attendions à ce résultat car le modèle présenté n'est pas un modèle de tissu enduit. L'enduction d'un tissu a tendance a bloqué le mouvement de la structure.

Afin de compléter les résultats quantitatifs de la traction, nous présentons en Figure II-71 (partie gauche) le rendu visuel des différentes étapes d'une traction. L'échantillon de tissu que nous avons simulé se caractérise par les paramètres géométriques suivants : T(tex)=50 tex (g/1000m), réduction trame = 3%, réduction chaîne = 3%, densité = 1,38.10⁺³ g/cm³, ainsi que les paramètres dynamiques ci-après : $c_f=10^{-3}$ kg.s⁻², $\mathbf{n}_{i,j}=11,43.10^{-5}$ kg.s⁻¹, a=0,12928039, b=7,353632, c=5,9485298, d=0,3209873. On distingue nettement de chaque côté de celui-ci le phénomène de propagation. Il provient de l'onde émise par les contraintes sur la partie haute de l'échantillon, la partie basse étant fixée. Ces efforts transversaux sont obtenus naturellement par la simulation et traduit l'effet de Poisson. Ce phénomène ondulatoire n'est pas perceptible dans la pratique, la dynamique de cet essai étant très rapide. Entre autre, par un choix judicieux de la fréquence de simulation et de la méthode de calcul employée, nous avons pu éviter les effets de super-élasticité que l'on retrouve souvent dans les systèmes masses-ressorts.

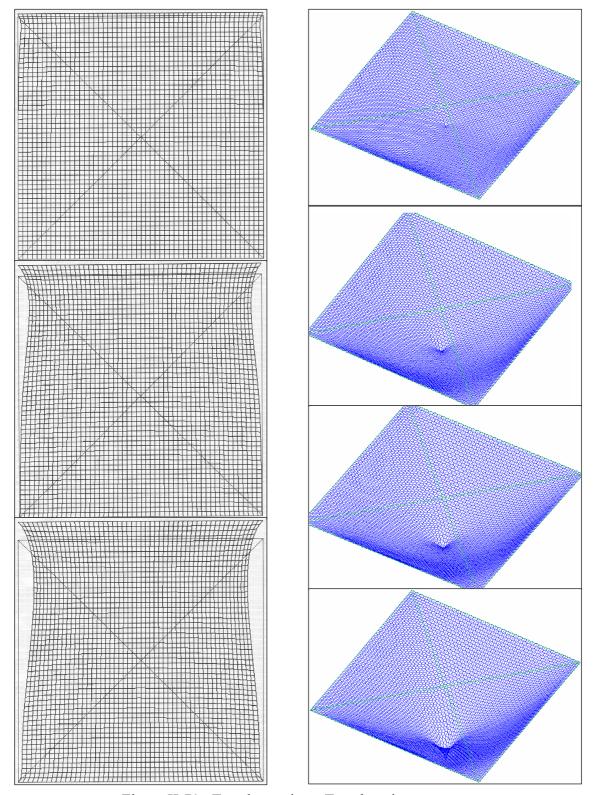


Figure II-71 : Test de traction - Test de poinçonnement

II.3.3.2.6 Résultats de simulation en poinçonnement du tissu

La Figure II-71 (partie droite) représente les différentes étapes de la simulation d'un poinçonnement ponctuel d'un échantillon de tissu. Les 4 côtés sont bloqués tout le long de l'essai. La force ponctuel du poinçon est ramenée sur le nœud central de l'échantillon. Cette

force de valeur fixe est traduite dynamiquement avec une vitesse constante. Nous remarquons que le tissu se déforme de manière homogène. Ce résultat était prévisible étant donné que notre tissu est parfaitement équilibré par son armure toile et par l'identité des fils de chaîne et de trame

II.3.3.3 Conclusion

Le modèle que nous proposons est défini à partir de sa géométrie, composée d'un réseau de ressorts appropriés, et des équations mathématiques issues du PFD des systèmes. Etant donné que le tissu est considéré comme un assemblage de fil, ce modèle présente l'avantage de prédire les propriétés mécaniques d'un tissu à partir des propriétés mécaniques des fils le constituant. La confrontation des tests de traction réels et des tests de traction simulés a permis de valider complètement le modèle de fil étant donné que les phénomènes d'hystérésis et de relaxation sont pris en compte. Le modèle de tissu a été validé dans un domaine d'utilisation parfaitement raisonnable. La comparaison entre les essais de traction réels et simulés l'ont démontré. Suivant l'application, il est toujours possible d'améliorer ce modèle. Aussi, dans l'objectif de tester virtuellement un tissu technique jusqu'à sa rupture, il sera nécessaire d'intégrer le comportement en glissement du fil en contact avec un autre fil, d'étudier les perturbations sur les propriétés mécaniques du tissu engendrées par l'enduction de celui-ci. Dans des applications traditionnelles telles que le textile habillement (drapé), il sera nécessaire d'envisager de tenir compte de la pré-tension de tissage des fils dans la structure tissu.

II.4. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce mémoire retrace 13 années d'activités universitaires et industrielles qui ont nécessité de nombreuses reconversions et adaptations tant sur le plan pédagogique, qu'administratif et scientifique, voire même industriel. L'activité pédagogique a été marquée par la mise en place de la CAO mécanique et textile, secteur qui exige d'évoluer régulièrement. L'activité administrative fut très enrichissante de par la mission de directeur des études qui m'a permis de développer le sens du contact qui a été conforté dans le cadre de mes co-directions de thèses. Les relations humaines sont prioritaires lorsque l'on est amené à diriger et encadrer.

Nous avons présenté dans ce mémoire la synthèse des travaux de recherche que nous avons menés et co-dirigés depuis 1992 au sein du GEMTEX. La partie post-doctorale a été volontairement omise afin de ne présenter que les travaux qui ont un rapport direct avec les thèmes forts du laboratoire GEMTEX. Les articles répertoriés dans le paragraphe I.2.5 permettront de renseigner les lecteurs intéressés par cette activité antérieure.

Parmi les trois volets de la partie recherche (modélisation, identification et simulation du comportement dynamique de fil ou de tissu), la partie théorique la plus innovante et prédominante se situe dans le cadre de la modélisation. L'élaboration de différents modèles interactifs donne le choix à l'utilisateur en fonction de l'application envisagée, de ses contraintes physiques et temporelles. L'originalité de la partie identification se situe dans la mise en place de tests pratiques associés aux différents comportements dynamiques des sous modèles composant le modèle global. Les travaux d'identification par morceaux mènent alors à des résultats plus précis. La caractéristique de la partie simulation se situe dans l'intégration de techniques modernes dans qui améliorent la convergence et la rapidité de calcul des algorithmes. La puissance résultant de l'utilisation d'outils avancés de l'automatique tels que le sur-échantillonnage et les méthodes prédictives est applicable à d'autres travaux présentant les mêmes difficultéss de temps de calcul ou de changement d'échelle de temps. Les choix et perspectives de ces axes de recherche résultent de la bonne coordination des éléments suivants :

• Compétences personnelles :

La modélisation nécessite de fortes compétences dans l'analyse des systèmes linéaires et non linéaires, des qualités d'observation afin de détecter les informations pertinentes sur les signaux issues du processus à modéliser. L'expérience acquise sur d'autres processus qualifiés de complexes contribue à imposer une démarche scientifique rigoureuse dans le déroulement méthodologique de la recherche. Les méthodes utilisant la programmation non linéaire ont été très exploitées dans le cadre de l'identification. Une double compétence dans le cadre de la modélisation et de l'identification aide à l'aboutissement et à la validation des travaux. De nombreux chercheurs exposent leur modèle de représentation de tissu, mais peu d'entre eux propose des méthodes d'identification. L'expérience acquise lors de mes interventions dans l'industrie textile permet de remonter des informations stratégiques sur le développement des recherches à caractère industriel.

• Mission du laboratoire GEMTEX :

La mission du laboratoire GEMTEX est définie clairement par son appellation : développer des travaux de recherche en GEnie et Matériaux TEXtiles. La thématique dans laquelle nous sommes intervenus en priorité s'intitule : modélisation et simulation des structures textiles. Rappelons que l'objectif scientifique de ce thème est de développer et d'adapter les méthodes de l'automatique pour résoudre les problèmes spécifiques rencontrés dans la caractérisation, la modélisation et la simulation du comportement

dynamique des matériaux textiles. Elle demande d'acquérir des connaissances dans la caractérisation du fil (naturel et synthétique) ou du tissu par la connaissance des procédés de tissage, dans la caractérisation mécanique du phénomène d'enduction (tissu enduit à usages technique). Les modèles développés et en cours de développement doivent tenir compte de ces considérations suivant l'application.

• Intérêts industriels :

L'intérêt industriel est au cœur de nos recherches. Souvent dans ce rapport nous avons répété que l'application industrielle dirigeait notre stratégie de modélisation et d'identification. Suivant le type de modèle, il peut être utilisé dans le cadre du textile—habillement (drapé de tissu, mannequin virtuel...) ou dans le cadre des textiles techniques (CAO de prototypage virtuel, machine d'essais virtuels...). Les techniques d'identification se sont orientées le plus souvent vers l'utilisation de moyens pratiques et accessibles à l'industrie textile (machines de traction, de flexion, de pesage...). Les contrats de recherche et de formation avec le numéro 1 mondial de la CAO confection (LECTRA) appuient fortement la nature industrielle et scientifique de nos recherches. Ces actions montrent l'intérêt que porte cette entreprise à suivre nos travaux de recherche.

• Coopérations nationales et internationales :

L'aboutissement de ces travaux reconnus sur le plan national et international, a permis de prendre contacts avec de nombreux scientifiques dans différents pays par le biais des mémoires fin d'études à l'étranger (cf. § I.3.1.4). Ils vont nous permettre de tisser progressivement un réseau de compétences dans notre domaine de recherche. L'équipe ayant démarré avec peu de connaissance dans ce domaine très pointu, ce n'est qu'après ces quelques années de recherche qu'il nous a été possible d'envisager cette extension.

En ce qui concerne les perspectives de recherche, elles sont multiples et ambitieuses :

Modélisation

Nous sommes conscients que les modèles développés peuvent être complétés et améliorés. Dans cet enchaînement de modèles, certains intègrent les non linéarités de la structure (modèles TuT) d'autres non (modèles TH). Nous les avons volontairement placé dans ces deux secteurs industriels en fonction de leur capacité de représentation et de leur rapidité de calcul. Il serait maintenant intéressant de les comparer avec des tests spécifiques afin de définir les limites physiques des modèles linéaires par rapport aux modèles non linéaires. Cela permettrait de définir leur domaine de validité physique indépendamment de l'application.

La modélisation des tissus techniques n'intègre pas tous les facteurs intervenant dans le processus d'enduction de la matière. Rappelons pour les non initiés au monde du textile qu'un tissu peut-être enduit au niveau du fil ou au niveau du tissu. En ce qui nous concerne, nous prenons en compte les phénomènes d'enduction au niveau du fil mais il serait intéressant de s'attacher à la problématique de l'enduction globale d'un tissu. On pourrait envisager une couche supplémentaire dans la stratégie de développement s'interfaçant avec les modèles existants.

Dans un souci d'aller toujours plus loin, au plus profond de la matière, l'élaboration d'un modèle de fil à partir des propriétés physiques de la fibre expliquerait certains mésophénomènes entraînant de fortes non linéarités. Cette perspective de développement aurait la faculté d'intégrer plus facilement les propriétés physico-chimiques des matériaux. Un rapprochement avec nos collègues chimistes serait alors parfaitement envisageable et nécessaire. De même, un lien avec les spécialistes de la géométrie fractale peut être

concevable, car travailler à différentes échelles d'observation montre que de nombreux phénomènes se réitèrent mais à des échelles différentes.

Identification

Une classification paramétrique à partir du modèle global du tissu (Tut) peut être envisagée. Le choix du critère reste à définir, de même que les essais intervenant dans le processus d'identification. Dans ce cas, nous ne serions plus aussi proches de l'industrie mais cela nous permettrait de mieux appréhender la problématique grands déplacements - petites déformations en se sensibilisant à chaque paramètre et en les classer selon un critère objectif.

On pourrait critiquer le manque d'ouverture vers des méthodes plus modernes d'identification utilisant la théorie floue, les méthodes neuronales, la génétique. Nous avons envisagé des développements futurs avec ce regard nouveau, mais suite à de nombreux entretiens avec les industriels du textile, nous avons pu observer que l'industrie textile n'est pas forcément prête à intégrer ces nouvelles techniques. La compétitivité passe avant l'intérêt scientifique de l'étude.

L'industrie a plutôt le souci de mettre en place une base de donnée tissu à partir de tests plus simples que l'existant et avec des méthodes rapides. Pour cela, la stratégie d'identification doit tenir compte de l'interactivité des modèles et leurs mises en cascade. Le modèle volumique 3D (paramètre fil), capable uniquement de simuler de petits échantillons, est suffisamment complet pour simuler les tests nécessaires à l'identification des paramètres du modèle surfacique (paramètre tissu). Aussi, au regard de nos travaux, l'industrie s'est orientée vers cette nouvelle philosophie : concevoir une base de données fil associée au modèle volumique 3D pour créer une tissu-thèque.

Simulation et Commande

Il a été impératif de valider les modèles de tissus en simulant des tests et de confronter les courbes simulées et pratiques. La partie simulation a tenu compte essentiellement de cet aspect. Mais, nos perspectives d'avenir dans le cadre de la simulation est de mettre en place un logiciel de CAO-TuT. Accéder aux propriétés mécaniques d'un tissu sans pour cela le confectionner est un enjeu de grande envergure. Vérifier la dynamique d'un échantillon de tissu tissé virtuellement réduit fortement les coûts d'échantillonnage, surtout lorsque celui-ci est à usage technique.

La notion de commande n'apparaît pas dans ce rapport mais elle est omniprésente. Dès que nous appliquons des efforts sur le tissu (traction, flexion, poinçonnement...), il travaille en régime forcé. La trajectoire de ces efforts est relativement simple à mettre en œuvre. Mais nous devons envisager que le tissu puisse suivre une trajectoire complexe. Par exemple, lors de la mise en place du simulateur de la chaîne de Kawabata, il sera nécessaire d'imposé un parcours précis des points extrêmes du tissu pour les tests de flexion et de cisaillement.

Nous n'avons pas présenté les travaux antérieurs relatifs à la commande robuste [C10][DEA2][DEA4] car nous ne les avons pas encore exploités dans ce nouveau thème. Le concept de commande robuste par la décomposition du modèle en sous-modèles [C9][C15][C14] est prêt. Cet axe de travail existera dans un proche avenir car les paramètres du tissu peuvent être variables. Les propriétés d'un tissu peuvent évoluer suivant de nombreux facteurs extérieurs tels que : la température, l'humidité, ...C'est la raison pour laquelle la plupart des tests textiles sont conditionnés dans un environnement précis et normalisé. Aussi, la voie de développement calquée sur les travaux antérieurs est toute tracée. Pour cela, nous étudierons l'influence des perturbations extérieures sur le comportement dynamique du tissu [C2]. Ensuite, nous définirons la notion de sûreté de fonctionnement [C4] lors d'un

comportement dynamique du tissu, caractérisée par les paramètres de commande [C5]. Enfin, nous établirons une marge de sécurité en fonction de la dynamique à respecter et de la position d'équilibre statique à atteindre, caractérisée aussi par les paramètres de commande [C3]. Cette vision semble futuriste mais incontournable pour certaines applications à risques que l'on trouve dans le domaine des Tuts.

P.BRUNIAUX - 123/128 - (ENSAIT/GEMTEX)

II.5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[BRO90] Brogan W.L.,

Modern Control Theory.

Quantum Publishers Inc., New York.

[WEI86] Weil J.,

The synthesis of cloth objects.

Computer graphics proceedings (proc siggraph 86), p 49-54, vol. 20, n° 4, (1986).

[PEI30-1] Peirce F.T.,

The handle of cloth as a measurable quality.

Journal Textile Institute, p 377, n° 21, (1930).

[KEM63] Kemp A.,

An extension of Pierce's cloth geometry to the treatment of non-circular threads.

Journal Textile Institute, Letters to the editor, 5 4, T9-T27, (1963).

[LEA64] Leaf G.A.V,

A generalized model of plain woven fabric.

Journal Textile Institute, p 431, n° 55, (1964).

[REA97] Realff M.L., Boyce M.C. & Backer S.,

A Micromechanical Model of the Tensile Behavior of Wowen Fabric.

Textile Research Journal, pp 445-459, n° 67, n° 6, June (1997).

[OLO64] Olofsson B.,

A general model of fabric as a geometric mechanical structure.

Journal Textile Institute, p 541, n° 55, (1964).

[GRO66] Grosberg P.,

The mechanical properties of woven fabrics (Part I, II, III, IV, V).

Textile Research Journal, pp 71-79; 205; 332-337; 338-345; 420-431, (1966).

[ABO73] Abott G.M., Grosberg P. & Leaf G.A.V.,

The elastic resistance to bending of plain-woven fabrics.

Journal of Textile Institute, p 346-362, n° 64, (1973).

[KAW73-1] Kawabata S., Niwa M. & Kwai H.,

The finite-deformation theory of plain-weave, part I: the biaxial deformation theory.

Journal of Textile Institute, p 21-46, n°64, (1973).

[KAW73-2] Kawabata S., Niwa M. & Kwai H.,

The finite-deformation theory of plain-weave, part II: the uniaxial deformation theory.

Journal of Textile Institute, p 47-61, n° 64, (1973).

[KAW73-3] Kawabata S., Niwa M. & Kwai H.,

The finite-deformation theory of plain-weave, part III: the shear deformation theory.

Journal Textile Institute, p 62-85, n°2, (1973).

[LIN60] Lindberg J. & Svenson R.,

Wool fabrics as garment construction materials.

Journal Textile Institute, p 1475, n° 51, (1960).

[KUN90] Kunii T.L. & Gotoda H.,

Modelling and animation of garment wrinkle formation processes.

Workshop on animation and simulation, Geneva, Switzerland, (1990).

[TSO91] Tsopolas N.,

Animating the crumbling behavior of garments.

Proc. Eurographics Workshop on animation and simulation, p 11-23, Vienne, Sept. (1991).

[BEZ86] Bezier P.,

Mathématiques et C.A.O.: Courbes et surfaces.

Editions Hermès, Paris, (1986).

[GAR85] Gardan Y.,

Mathématiques et C.A.O.: Méthodes de bases.

Editions Hermès, vol. 1, Paris, (1985).

[AMI89] Amibayat J. & Hearle J.W.S.,

The anatomy of buckling of textile fabrics: drape and conformability.

Journal of textile institute, p 51-70, vol. 80, n° 1, (1989).

[CHE95] Chen B. & Govendaraj M.,

A physically based model of fabric drape using flexible shell theory.

Textile Research Journal, p 324-330, vol. 65, n°6, (1995).

[ZIE77] Zienkiewicz O.C.,

The finite element method.

Third edition, Mc Graw Hill, (1977).

[JON77] Jong S. & Postle R.,

An introduction to the study of fabric mechanics using energy methods.

Journal Textile Institute, p 376-379, n° 15, (1977).

[CHE96] Chen B. & Govendaraj M.,

A parametric study of fabric drape.

Textile Research Journal, p 17-24, vol. 66, n°1, (1996).

[PRO97] Provot X.,

Animation réaliste de vêtements.

Thèse de docteur en sciences, Université René Descartes Paris V, 207 p., 16 décembre (1997).

[ASC96] Ascough J., Bez H.E. & Bricis A.M.,

A simple beam element, large displacement model for the finite element simulation of cloth drape.

Journal of Textile Institute, p 152-165, vol. 87, part 1, n° 1, (1996).

[TER87] Terzopoulos D., Platt J., Barr A. & Fleisher K.,

Elastically deformable models.

Computer graphics (Proc. SIGGRAPH), p 205-214, vol. 21, n° 4, (1987).

[TER88] Terzopoulos D. & Fleisher K.,

Deformable models.

The visual computer, p 306-331, vol. 4, (1988).

[BRE94-1] Breen D.E., House D.H. & Wozny M.J.,

A practical-based model for simulating the draping behaviour of woven cloth.

Textile Research Journal, p 663-685, vol. 64, n° 11, (1994).

[BRE94-2] Breen D.E., House D.H. & Wozny M.J.,

Predicting the drape of woven cloth using interacting particules.

Computer graphics proceedings (Proc. SIGGRAPH 94), p 365-372, vol. 28, (1994).

[BOS65] Bossut R.,

Mathématiques modernisées : des études à l'industrie.

Editions Technique & Vulgarisation, Paris, (1965).

[CHO68] Choquet-Bruhat Y.,

Géométrie différentielle et systèmes extérieurs.

Editions Dunod, Paris, (1968).

[THO79] Thope J.A.,

Elementary topics in differential geometry.

Editions Springer-Verlag, New York, (1979).

[LEL63] Lelong-Ferrand J.,

Géométrie différentielle : tenseurs – formes différentielles.

Editions Masson et Cie, Paris, (1963).

[LIC69] Lichnerowicz A.,

Introduction à la géométrie des variétés différentielles.

Editions Dunod, Paris, (1969).

[GEO85] George P.L.,

Problèmes évolutifs.

Modulef, Brochure n° 63, I.N.R.I.A., (1985).

[ZIE77] Zienkiewicz O.C.,

The finite element method.

Third edition, Mc Graw Hill, (1977).

[GOL64] Goldstein H.,

Mécanique Classique.

Presses Universitaires de France, (1964).

[VAN96] Vangheluwe L. & Kiekens F.,

Modeling mechanical behaviour of fabric and warp yarn during loom stops.

Textile Research Journal, p 722-726, vol. 66, n°10, (1996).

[PIN93] Pinchon D. & Bruniaux P.,

Identification des paramètres d'un système électromécanique non linéaire. Influence du modèle d'étude.

I.M.A.C.S-T.C.1'93, 4th International Conference on Computational Aspects of Electromechanical Energy Converters and drives, Montreal, Canada, (1993).

[BRU94] Bruniaux P., Koncar V. & Pinchon D.,

Non linear system identification by decomposition in subsystems.

European Simulation Multiconference, Barcelone, Spain, 01-03 Juin, (1994).

[LAU85] Laurent R.,

Modélisation et identification des systèmes complexes.

Thèse de docteur ès sciences, UST de Lille 1, (1985).

[NAK88] Nakrachi A.,

Contribution à la modélisation et l'identification de la fermentation méthanique.

Thèse de doctorat, UST de Lille 1, (1988).

[GEI84] Zwingelstein G.,

Panorama des méthodes d'identification de processus. Les méthodes non paramétriques.

Edition le Nouvel Automatisme, (1984).

[KAW80] Kawabata S.,

The standardization and analyse of hand evaluation.

The textile machinery society of Japan, Osaka, (1980).

[GOS90] Gosh T.K., Batra S.K. & Baker R.L.,

The bending behaviour of plain-woven fabric, part Hi: Thread-bending behaviour and the affect of fabric.

set. 81(3):272-287, (1990).

[PEI30-2] Pierce F.T.,

The geometry of cloth structure.

Journal of Textile Institute, p 45-95, Vol. 46, n° 5, (1930).

[ZHO97-1] Zhou N. & Ghost T.K.,

On-line measurement of fabric bending behaviour, part I: Theorical study of static loops.

Textile Research Journal, p 712-719, vol., n°, (1997).

[ZHO97-2] Zhou N. & Ghost T.K.,

On-line measurement of fabric bending behaviour, part II: Effects of fabrics nonlinear bending behaviour.

Textile Research Journal, p 712-719, vol., n°, (1997).

[ZHO99-3] Zhou N. & Ghost T.K.,

On-line measurement of fabric bending behaviour, part III: Dynamic considerations and experimental implementation.

Textile Research Journal, p 176-184, vol., n°, (1999).

[RIC71] Richalet J., Rault A. & Poulinquen R.,

Identification des processus par la méthode du modèle.

Gordon and Breach, Thèorie des sytèmes, vol. 4, (1971).

[POW64] Powell M.J.D.,

A method for minimizing a sum of squares of a non-linear functions without calculating derivatives.

Computer Journal, Vol. 7, (1964).

[JON78] De Jong S. & Postale R.,

A general analysis of fabric mechanics using optimal control theory.

4S:12~137, (1978).

[BAR98] Baraff D. & Witkin A.,

Large steps une cloth simulation.

Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), pages 4344, (1998).

[BRE96] Brenan K., Campbell S. & Petzold L.,

Numerical Solution of initial-Value Problems in Differential-Algebraic Equations.

Society for Industrial and Applied Mathematics, (1996).

[HAI89] Hairer E., Lubich M. & Roche C.,

The numerical solution of differential-algebraic equations by runge-kutta methods.

Lecture Notes in Mathematics, 1409, (1989).

[GEA71] Gear C.W.,

The simultaneous numerical solution of differential algebraic equations.

IEEE Trans. Circuit Theory, p 89-95, (1971).

[GEA85] Gear C.W., Leimkuhler B. & Gupta G.K.,

Automatic integration of euler-lagrange with constraints.

Journal of Computational and Applied Mathematics, p 77-90, (1985).

[PET82] Petzold L.R.,

A description of dassl: a differential/algebraic system solver.

Proc. 10th IMACS World Congress, August (1982).

[AFN75] Afnor,

recueil de normes françaises textiles, terminologie et méthodes d'essais.

tome 1 et tome 2, (1975).