

Thèse

présentée à

**L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
LILLE**

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

En Productique : Automatique et Informatique Industrielle

par

Xavier LEGRAND

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

Soutenue le 21 décembre 2000, devant le jury d'examen

Jean Marie CASTELAIN	Président	Professeur des Universités, Directeur de l'ENSAIT
Jean Louis PILLOËT	Rapporteur	Professeur des Universités, LMS ENSAM Paris
Robert LAURENT	Rapporteur	Professeur des Universités à l'UT d'Orléans
Michel ZIAKOVIC	Examineur	Ingénieur R&D LECTRA SYSTEMES
Christian VASSEUR	Directeur de Thèse	Professeur des Universités à Lille I, Laboratoire I3D
Pascal BRUNIAUX	Codirecteur de Thèse	Maître de conférences à l'ENSAIT

*"Les chercheurs expliquent ce qui est,
les ingénieurs inventent ce qui n'est pas."*
Albert EINSTEIN (1879-1955)

Remerciements

J'exprime tous mes remerciements à Monsieur Jean Louis BILLOËT, professeur des Universités au LMS ENSAM Paris et Directeur des formations au CNED et à Monsieur Robert LAURENT, professeur des Universités à l'IUT d'Orléans pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Christian VASSEUR, professeur des Universités, Directeur du Laboratoire I3D de l'universités de Lille I, pour avoir été le responsable scientifique de cette thèse et pour son aide précieuse lors de la rédaction.

Mes plus vifs remerciements vont à Monsieur Jean Marie CASTELAIN, professeur des Universités, Directeur de l'ENSAIT, qui me fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Merci à Monsieur Michel ZIAKOVIC, ingénieur Recherche et Développement chez LECTRA SYTEMES d'avoir accepté d'être examinateur de ma thèse.

J'exprime ma plus profonde gratitude à Monsieur Pascal BRUNIAUX, Maître de conférences à l'ENSAIT, qui, par sa patience et ses conseils tant sur le plan humain que scientifique, a su me passionner pour la recherche et me motiver tout au long de ces années de thèse.

Je ne voudrais pas oublier de remercier l'ensemble du laboratoire GEMTEX et en particulier son actuel directeur, Monsieur Serge BOURBIGOT.

Merci à la Région Nord – Pas-de-Calais d'avoir soutenue financièrement ce travail de thèse, et à ADRINORD d'en avoir assuré la gestion.

Enfin, que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué au bon déroulement de ce travail de thèse, se voient ici remerciés.

Table des matières

Introduction générale	5
Etat de l'art sur la modélisation des tissus	10
1. Introduction	10
2. Les tissus techniques	10
3. Modèles de tissu	12
3.1. Approche géométrique	13
3.2. Approche mécanique	15
3.2.1. Le modèle de Pierce	15
3.2.2. Les modèles de Olofsson et de Grosberg	16
3.2.3. Les modèles de Norris et de Schock	18
3.2.4. Le modèle de Abbott	19
3.2.5. Le modèle de Kawabata	20
3.2.6. Le modèle de Breen	21
3.2.7. Le modèle de Taylor	22
3.2.8. Le modèle de Postle et Jong	23
3.2.9. Le modèle de Provot	24
4. Modèles de fil	25
5. L'approche proposée	27
5.1. Objectifs	27
5.2. Approche	27
Modèles de fil et de tissu	31
6. Introduction	31
7. Modèle de Fil	31
7.1. Partie géométrique	31
7.2. Partie mécanique	33
8. Modèle de Tissu	37
8.1. Introduction	37
8.2. Géométrie générale	37
8.3. Géométrie de l'Elément de base	39
<i>Contribution à la modélisation dynamique et à l'identification de tissus techniques</i>	1

8.4. Mécanique de l'élément de base	40
9. Méthodes d'intégration et d'optimisation	44
9.1. Intégration du système dynamique	44
9.2. Propagation et optimisation des calculs	46
9.2.1. Propager l'onde mécanique : méthode des rangs	46
9.2.2. Améliorer le temps de calcul : méthode du multi-échantillonnage	47
9.2.3. Améliorer le temps de calcul : méthode prédictive	48
9.3. Mise en œuvre	52
10. Conclusion	53
Identification des paramètres d'un fil	57
11. Introduction	57
12. Identification du comportement en traction	58
12.1. Objectif	58
12.2. Dispositif expérimental	58
12.3. Modélisation du comportement en traction	60
12.3.1. Modèle élastique non linéaire : modèle de comportement	60
12.3.2. Modèle rhéologique viscoélastique	61
12.3.3. Modèle viscoélastique non linéaire avec relaxation	63
13. Identification du comportement en flexion	67
13.1. Objectif	67
13.2. Dispositif expérimental	68
13.2.1. Principe général	68
13.2.2. Dispositif de lâché de fil	68
13.2.3. Le système de prise d'images	69
13.2.4. Traitement des images	70
13.3. Identification du paramètre C_f	75
13.3.1. Démarche méthodologique	75
13.3.2. Principe général	75
13.3.3. Méthodes utilisées	76
13.3.4. Intérêts et limites de la démarche retenue	78
13.3.5. Réglages préliminaires à l'identification	78
14. Analyse du comportement en propagation	79
14.1. Objectif	79
14.2. Dispositif expérimental	79
14.3. Choix des conditions opératoires	81
14.3.1. Influence de la longueur de l'éprouvette	81
14.3.2. Influence de la longueur de l'impulsion	82

14.3.3. Influence de la masse de prétention du fil	82
14.3.4. Choix réalisé	83
14.4. Choix de la période d'échantillonnage	83
15. Conclusion	83
Résultats et validation	87
1. Introduction	87
2. Les logiciels développés	88
2.1.1. Le logiciel de simulation	88
2.1.2. Le logiciel de visualisation	91
3. Résultats d'identification des paramètres de fils	92
3.1. Présentation des fils étudiés	92
3.2. Comportement en traction	92
3.2.1. Traction sans vitesse	93
3.2.2. Relaxation	95
3.2.3. Hystérésis	97
3.3. Comportement en flexion	99
3.4. Comportement en propagation	101
4. Résultat de simulation et comparaison aux tests réels en traction mono axiale	101
4.1. Présentation des tissus étudiés	101
4.2. Conditions initiales de simulation et du test réel	102
4.3. Tissu de siège automobile A1 : armure toile	103
4.4. Tissu de store : armure cannelé 2-2	104
4.5. Fil de siège automobile A2 : armure sergé de 3	105
5. Résultats complémentaires	106
5.1. Déchirure en traction	106
5.2. Test de poinçonnement	107
6. Conclusion	109
Conclusion générale	111
Bibliographie	115
Annexe : Lexique textile	120
Annexe : Armures en tissage	121
Annexe : Modèle viscoélastique	123
Annexe : Théorème de SHANNON	125

Introduction générale

Introduction générale

La découverte de nouvelles matières textiles et l'amélioration des propriétés des textiles existants ont permis de développer des applications qui jusqu'alors étaient réservées à des matériaux non textiles. Par leur souplesse de mise en œuvre et par l'exploitation de leurs propriétés mécaniques, thermiques, électriques, etc ... exceptionnelles, ces nouveaux textiles ont conduit à l'émergence d'un domaine appelé Textiles à usages Techniques ou TuT.

Par ailleurs, les industries textiles traditionnelles des pays industrialisés sont confrontées à une forte concurrence de la part des industries textiles des pays à faible coût de main d'œuvre. Dans ce contexte, l'évolution vers des applications techniques à la fois innovantes, à forte valeur ajoutée et peu sensibles à la contrefaçon, représente une tendance irréversible. Les laboratoires de recherches mettent donc l'accent sur le développement de nouveaux processus permettant d'améliorer sans cesse la qualité des TuT. La recherche de nouvelles applications pour les TuT est également favorisée. Ainsi, dans divers domaines, tel que le secteur de l'automobile, les TuT tendent à supplanter l'acier sous la forme de matériaux composites. Les progrès accomplis dans les nouveaux matériaux et dans leurs procédés de fabrication font des TuT une industrie de haute technologie.

Aujourd'hui, les textiles techniques représentent 35% à 40% du marché textile mondial actuel. Ils font partie intégrante de notre environnement, s'immisçant même là où ils ne sont pas attendus. Leurs utilisations sont vastes et variées. C'est ainsi que nous pouvons citer : les vélums (utilisés dès l'époque romaine) qui sont à l'origine des structures tendues, les géotextiles utilisés pour stabiliser les sous-sols et les routes, les composites et les plastiques armés, les tenues jetables et les vêtements de protection, les voiles de bateaux. De plus, leur taux d'utilisation par rapport aux textiles traditionnels et leur part du marché par rapport aux autres matériaux ne cessent de progresser. Cependant, leur mise en œuvre, très spécifique, reste souvent longue et surtout coûteuse. Tout textile, en effet, destiné à un usage technique doit posséder un certain nombre de caractéristiques physiques et / ou physico-chimiques qu'il convient d'évaluer avec précision et rigueur. Cette caractérisation nécessite de nombreux tests sur éprouvettes (traction, poinçonnement,...), généralement destructifs. [Madr 95]. Ces tests, souvent longs et coûteux obèrent le coût du TuT. C'est la raison pour laquelle, dans le cadre du laboratoire GEMTEX, nous nous attachons à développer des

méthodes mathématiques permettant de modéliser les TuT et donc d'en éviter les tests. A terme, l'objectif de ces travaux est de simuler l'utilisation et le comportement d'un TuT avant le lancement de sa fabrication, l'avantage économique étant indéniable. La volonté est donc de proposer un outil de conception et de prototypage virtuels.

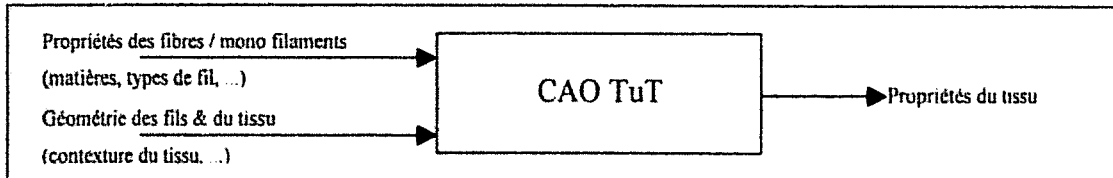


Figure 1 : Objectif de l'équipe.

Cette démarche nécessite de connaître les propriétés fondamentales des fibres (et / ou mono filaments) et des fils constituant le tissu étudié ainsi que les caractéristiques de fabrication du tissu lui-même (géométrie). Il s'agit alors de mettre au point un logiciel de CAOTuT (Conception Assistée par Ordinateur de Textiles à Usages Techniques) permettant d'optimiser le choix de constitution d'un TuT (matières, type de fils, contexture du tissu, ...) en fonction d'un cahier des charges imposé (Figure 1). On entend par CAO TuT, un outil permettant de définir virtuellement l'architecture TuT et d'en calculer les propriétés afin de répondre à son cahier des charges. Au-delà, ce logiciel doit permettre de renseigner une base de connaissance exploitable pour déterminer toutes les caractéristiques d'un TuT (et de ses constituants) en fonction de son utilisation future, ceci avant même toute fabrication.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de définir un modèle de tissu permettant le passage du fil au tissu. C'est à partir de ce modèle que sera constituée la base du logiciel de CAO TuT. L'étude, financée par la région Nord – Pas de Calais, a été effectuée au sein du laboratoire GEMTEX (Génies et Matériaux Textiles) de l'ENSAIT (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles).

Afin de présenter notre travail selon ces différents aspects, nous avons choisi d'organiser ce document en cinq chapitres.

Le **premier chapitre** est consacré à une présentation de l'état de l'art de la modélisation des tissus tissés et non-tissés. L'accent est mis sur les tissus à usages techniques et leurs très nombreuses applications. Ensuite, les principaux travaux du domaine sont résumés. Cette première partie se termine par la présentation de l'approche que nous proposons et des objectifs que nous nous sommes fixés.

Dans le **deuxième chapitre**, exploitant le fait qu'un tissu est un entrecroisement de fils, nous présentons d'abord le modèle de fil retenu. Le modèle de tissu, intégrant le modèle de fil précédemment défini, est ensuite développé, à partir d'outils d'intégration et d'optimisation spécifiques.

Le **troisième chapitre** est axé sur la détermination des paramètres d'un fil. En particulier, nous présentons une méthode originale qui permet d'appréhender le comportement en flexion. L'identification de ces paramètres est réalisée en associant des techniques de traitement d'image à une méthode du modèle.

Le **quatrième chapitre** présente les essais qui permettent de valider les modèles mathématiques du fil et du tissu. Deux types d'essais couramment utilisés dans les applications TuT, ont été mis en œuvre : l'essai de traction mono axiale et l'essai de poinçonnement.

La **Conclusion Générale** souligne les limites de l'étude et met l'accent sur l'ouverture de nouvelles pistes de recherche. Elle montre notamment la nécessité d'un modèle générique de tissu pouvant être simplifié selon le type d'application envisagé.

Chapitre I

Etat de l'art sur la modélisation des tissus

Etat de l'art sur la modélisation des tissus	10
1. Introduction	10
2. Les tissus techniques	10
3. Modèles de tissu	12
3.1. Approche géométrique	13
3.2. Approche mécanique	15
3.2.1. Le modèle de Pierce	15
3.2.2. Les modèles de Olofsson et de Grosberg	16
3.2.3. Les modèles de Norris et de Schock	18
3.2.4. Le modèle de Abbott	19
3.2.5. Le modèle de Kawabata	20
3.2.6. Le modèle de Breen	21
3.2.7. Le modèle de Taylor	22
3.2.8. Le modèle de Postle et Jong	23
3.2.9. Le modèle de Provot	24
4. Modèles de fil	25
5. L'approche proposée	27
5.1. Objectifs	27
5.2. Approche	27

Etat de l'art sur la modélisation des tissus

1. Introduction

Dans un premier temps, nous tentons de préciser la notion de TuT et les applications envisageables. A partir de là, il est possible de définir le contexte d'utilisation d'un TuT afin de mieux appréhender le type de sollicitations simples auquel il est soumis.

Ensuite, nous présentons l'état de l'art concernant les modélisations des tissus tissés. Il est à remarquer que la modélisation des étoffes n'est pas un sujet particulièrement récent étant donné que le plus ancien des travaux date de 1878 [LUCA 78] [TCHE 78]

Nous explicitons finalement notre approche de la problématique et les objectifs que nous nous sommes fixés.

2. Les tissus techniques

Définir la notion de TuT est très délicate. L'adjectif « technique », par trop général, n'a de sens que si le contexte d'utilisation du produit est défini. Il peut paraître évident, en effet, de dire d'un géotextile qu'il entre dans le cadre des TuT. Il n'en est pas de même pour un tablier de boucher ou bien encore pour une combinaison de plongée. Pourtant, ces deux derniers exemples sont et doivent être considérés comme des TuT. L'utilisation qui est faite du textile conditionne son appellation. Ainsi, le tablier de boucher est un vêtement de protection contre la coupure dans son utilisation conventionnelle, et peut être considéré, dans ce cas, comme un TuT. Cependant, si un tablier est utilisé lors d'une dégustation dans un rayon charcuterie d'un supermarché, comme élément de la « panoplie de boucher », sa fonction n'est plus de protéger contre la coupure. Ainsi, bien que tablier de boucher, il n'est plus en TuT.

Aussi, dans le cadre de cette étude, nous adoptons la définition suivante : « *Textiles à usages Techniques : tout textile possédant des caractéristiques physiques et ou physico-chimiques adaptées à une application spécifique, définies par son cahier des charges.* ». Ainsi, un TuT se différencie d'un textile traditionnel par le soin qui est apporté à choisir ses constituants, sa géométrie, sa fabrication, ses post-traitements..., . Les TuT doivent donc répondre à des cahiers des charges exigeants en terme de performances mécaniques, thermiques, électriques,

etc.. Leur champ d'application est alors extrêmement vaste comme le montre le Tableau I-2-1. [SPAA 95]

Dans notre étude, nous nous limitons à la modélisation des TuT d'un point de vue mécanique. Plus précisément à leurs comportements à la traction uni axiale et bi axiale, au cisaillement, au poinçonnement. Les autres propriétés ne sont pas prise en compte dans cette étude.

Domaines	Produits
Industrie / filtration	filtres pour liquides, gaz ou poussières, textiles antistatiques, pour utilisation en milieu agressif, emballages, courroies, cordages, sangles, rubans, tuyaux souples, renforts pour plastiques, caoutchouc et composites...
Géologie, environnement	consolidation des sous-sols, constructions paysagées, terrassement et construction des routes, drainage, protection des pentes et littoraux contre l'érosion...
Protection	protection anti-feu, barrières anti-humidités, vêtements de travail, protection contre les produits chimiques, équipements de survie, gilets par balles...
Automobile et transport (ferroviaire, aéronautique, naval)	renforts de composites et de pneumatiques, ceinture de sécurité, isolation, revêtements de sièges, filtres et tuyaux flexibles, bâches de camions, conteneurs souples pour carburants, gilets de sauvetages...
Bâtiment	renforts pour béton et plastiques, drainage, isolation, étanchéité, toitures et terrasses, câbles composites pour ancrages et haubanages, aménagements intérieurs, structures architecturales...
Médecine / hygiène	bandes, compresses, pansements, armatures de prothèses, produits pour la chirurgie, serviettes opératoires, vêtements pour médecins et infirmières...
Agriculture	matériaux de couvertures du sol, systèmes de drainages et d'irrigations, équipements pour serres, réservoirs souples et rigides...
Loisirs	articles de sport, cordes et voiles de voiliers, cordes de montagne, parapentes, bateaux pneumatiques, tentes, outils...

Tableau I-2-1 Une vaste gamme d'applications (d'après sources Clubtex)

Compte tenu du contexte ainsi défini, la simulation de comportement envisagée peut s'appliquer dans des domaines aussi variés que la géologie, la protection, l'automobile et les transports en général, le bâtiment, l'agriculture ou bien encore le vaste domaine des loisirs, ce qui représente déjà un éventail d'applications très large.

La suite de l'exposé est constituée de la bibliographie des modèles de tissus tissés et non-tissés d'une part, et du modèle de fil d'autre part.

3. Modèles de tissu

Compte tenu de la perte de temps et de matière considérable occasionnée par l'étude d'un nouveau tissu, de nombreuses recherches ont été menées dans le cadre de la modélisation des tissus. Lucas [LUCA 78] et Tchebichef [TCHE 78] sont les précurseurs dans ce domaine. Dès 1878, Lucas présente des travaux sur la géométrie du Tissage des étoffes à fils rectilignes. Tchebichef propose un système d'équations permettant de définir la "drapabilité" d'un tissu posé sur une forme donnée, mais sans pour cela résoudre ce système. Quelques années plus tard, en 1912, Haas [HAAS 12] s'intéresse à l'aspect mathématique du comportement d'un tissu.

Il est important de signaler que la bibliographie qui suit ne se limite pas à la seule modélisation des Textiles à Usages Techniques, mais traite plus généralement des tissus tissés. Aussi, tout modèle peut être, la plupart du temps, adapté aux TuT.

L'un des problèmes majeurs dans la modélisation des tissus est l'impossibilité d'appliquer les hypothèses de la mécanique des matériaux classiques, en raison de la complexité du comportement des matériaux textiles qualifiés de matériaux souples. Aussi, en général, les modélisations existantes consistent-elles à dégager des relations entre la sollicitation exercée sur la cellule de base de l'élément tissé et la réponse de ce dernier en utilisant un modèle pour cette cellule de base. La cellule de base, lorsqu'il ne s'agit pas d'un Élément Fini, est, la plupart du temps, le point de croisure entre la chaîne et la trame dans une armure de type toile [NGUY 93][SINO 93][WU 92].

De plus, les utilisations des tissus étant diverses et variées, les approches proposées dans la bibliographie, pour leurs modélisations, sont multiples. Cependant, il est possible de les classer en trois types.

Le premier type, qui correspond à l'approche géométrique, s'applique au contrôle qualité des textiles tissés pour l'habillement et la décoration. Il s'attache à décrire géométriquement la déformation d'un tissu due à des déplacements simples et faibles de ses extrémités. Pierce [PIER 37] a beaucoup étudié cet aspect. Les études correspondantes sont souvent fondées sur des hypothèses simplificatrices et analysent la géométrie de la structure sans prendre en considération son comportement mécanique [BLAN 95].

Le deuxième type, correspondant à l'approche mécanique, concerne le comportement mécanique des étoffes et en particulier leurs utilisations dans les composites. Nous pouvons citer les travaux de Grosberg [GROS 66], Olofsson [OLOF 64], Kawabata [KAWA 73], Postle [POST 81], Mack et Taylor [MACK 56], Lene [LENE 84] ou bien encore Boisse

[BOIS 95] et Cherouat [CHER 95]. Ces différents auteurs utilisent des modèles mécaniques qui prennent en considération l'équilibre des forces et des couples internes et externes dans la structure.

Le troisième type, très utilisée en infographie, vise à traduire les propriétés de drapé des tissus. Après avoir défini la géométrie des tissus en trois dimensions, les auteurs s'attachent à effectuer des rendus réalistes en appliquant des textures. Dans ce contexte, l'approche mécanique est très approximative. Dans ce cas, Weil [WEIL 86], Breen [BREE 92] et Magnenat-Thalmann [MAGN 96] sont les auteurs les plus cités. En fait, cette approche combine les deux approches précédentes. Après des considérations géométriques, ce troisième type détermine les déformations de chaque éléments du maillage. Elle considère l'épaisseur du tissu comme négligeable et le représente simplement comme une surface 2D, ne tenant compte ni de sa composition, ni de sa texture.

3.1. Approche géométrique

Le modèle géométrique qui fait référence dans le domaine de la modélisation des tissus est sans nul doute celui de Pierce [PIER 30] [PIER 37]. Dans ce modèle, les fils de chaîne et de trame présentent des formes géométriques bidimensionnelles. L'auteur les schématise alors par des suites de segments linéaires et circulaires (Figure 1-3-1). Selon cette approche, il est possible de calculer les paramètres géométriques d'une armure. Ce modèle a toutefois un inconvénient de ne permettre de traiter que des tissus simples comme l'armure toile.

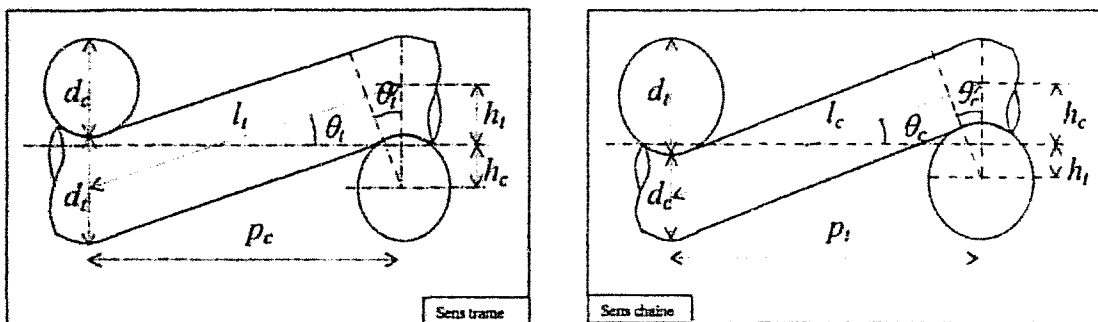


Figure 1-3-1 Modèle de Pierce (d'après [PIER 37])

Pierce critique ses propres travaux et indique que son modèle n'est valide que si les fils ont une section droite circulaire et que s'ils sont quasi incompressibles, tout en étant parfaitement flexibles. Ces contraintes conduisent à une courbure du fil uniforme imposée par la section droite du fil entrecroisé.

L'indice c désignent les paramètres relatifs à la chaîne, l'indice t désignent les paramètres relatifs à la trame. Les différents paramètres géométriques définis sur le schéma de la Figure I-3-1 sont les suivants : ($i \in \{c, t\}$)

- d_i : diamètres des fils de chaîne ou de trame,
- p_i : distances entre deux fils de chaîne ou deux fils de trame consécutifs,
- l_i : longueurs du fil entre deux points de croisement,
- θ_i : angles entre l'axe du fil de chaîne ou de trame et le plan du tissu,
- h_i : distances entre le plan du tissu et le centre du fil de chaîne ou de trame à la position de croisement.

Par de simples considérations géométriques, l'auteur obtient un système de sept équations à onze paramètres. La connaissance de quatre de ces paramètres, lui permet de calculer les autres. Afin de faciliter la résolution du système, Pierce propose des abaques reliant .

Afin de prendre en compte l'aplatissement des fils au niveau des contacts, Pierce propose d'adopter une forme elliptique pour la section du fil (Figure I-3-2a).

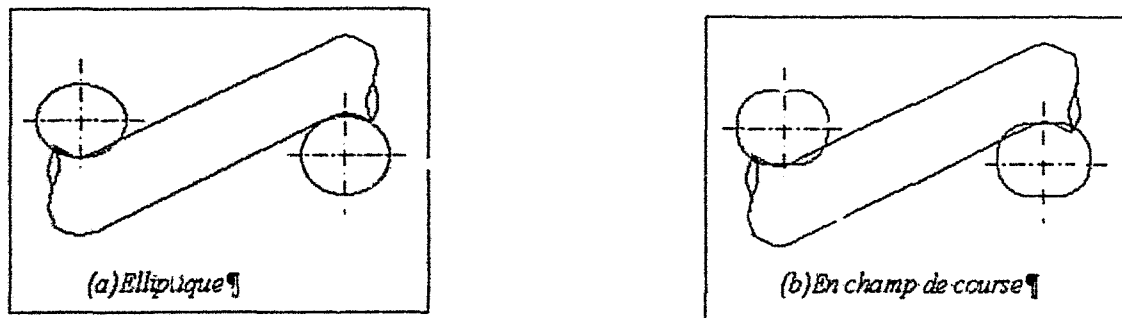


Figure I-3-2 Modèles dérivés de Pierce

Cette approximation n'est valable que pour des structures peu serrées. Kemp [KEMP 58] propose de représenter la section d'un fil dans un tissu toile sous la forme d'un « *champ de course* » sans pour cela changer la valeur de la section du fil (Figure I-3-2b).

Ces modèles ne s'appliquant qu'à l'armure toile, Hamilton [HAMI 64] les a adapté, avec les mêmes hypothèses, à l'étude de d'autres armures plus complexes que la toile.

Autant ces différents modèles sont intéressants pour prévoir et contrôler les paramètres géométriques (masse, dimensions) d'un tissu, autant ils sont inexploitable pour l'analyse des propriétés mécaniques de celui-ci.

3.2. Approche mécanique

3.2.1. Le modèle de Pierce

Pierce a aussi développé un modèle mécanique fondé sur son modèle géométrique. Il considère, dans ce nouveau modèle, que les fils sont dotés d'un comportement élastique. Ceci lui permet de prendre en compte les forces exercées et les déformations du matériau sous sollicitations. Les notations du modèle géométrique précédemment expliqué sont complété par un indice traduisant deux instants. L'indice 1 désignent les paramètres à l'instant initial, l'indice 2 désignent les paramètres à l'instant où le tissu est sous sollicitations. Si le tissu s'allonge suivant les axes X et Y (X et Y correspondent aux sens chaîne et trame), sous les sollicitations F_x et F_y (F_x et F_y sont les forces par unité de longueur du tissu), trois grandeurs peuvent être calculées :

$$F_x = \frac{T_c \cos(\theta_{2c})}{p_{2l}} \quad \text{Equation 3-1}$$

$$F_y = \frac{T_l \cos(\theta_{2l})}{p_{2c}} \quad \text{Equation 3-2}$$

$$F_{co} = 2 T_c \sin(\theta_{2c}) = 2 T_l \sin(\theta_{2l}) \quad \text{Equation 3-3}$$

avec :

T_c, T_l : tension du fil de chaîne, de trame,

F_{co} : force de compression,

Afin de résoudre ce système d'équations complexe, Pierce utilise les hypothèses simplificatrices suivantes :

- les fils sont inextensibles et incompressibles,
- les fils sont parfaitement flexibles, c'est à dire que seules les variations d'embuvage et de retrait interviennent dans la déformation du tissu.

A partir de ces hypothèses, il est possible de résoudre le système d'équations et de déterminer les valeurs de θ_{2c} et θ_{2l} ainsi que les valeurs p_{2c} et p_{2l} en imposant le taux de force linéique F_x/F_y .

Il est important de préciser que considérer le fil inextensible suppose que l'on soit dans un domaine d'extension du tissu relativement faible. En effet, le comportement du fil dans ce domaine d'extension résulte de l'élimination de l'ondulation du fil.

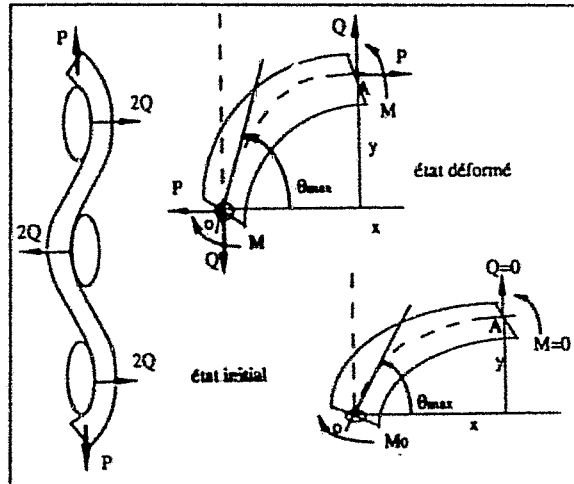
A partir du modèle mécanique de Pierce, d'autres chercheurs ont proposé des modèles très proches en modifiant les hypothèses de Pierce. On peut citer ici les modifications suivantes :

- forme elliptique de la section au lieu d'une forme circulaire,
- l'axe de fil de forme sinusoïdale,
- l'axe de fil en ligne brisée.

Parmi ces travaux, signalons ceux de Leaf [LEAF 64], Olofsson [OLOF 64] et Grosberg [GROS 66].

3.2.2. Les modèles de Olofsson et de Grosberg

L'intérêt du modèle de Olofsson est qu'il prend en compte l'état de déformation du fil tout en proposant une section de fil non circulaire. Il se limite à un problème plan et considère le fil soumis à une sollicitation entraînant une force d'allongement P et une réaction $2Q$ (Figure I-3-



3).

Figure I-3-3 Modèle de Olofsson

L'équation d'équilibre général du modèle s'écrit :

$$M + Py - Qx = 0 \quad \text{Equation 3-4}$$

dans laquelle (x, y) représentent les coordonnées de la section du fil, et M est le moment de flexion.

La géométrie du tissu permet d'écrire :

$$dx = ds \cos \theta, \quad dy = ds \sin \theta \quad \text{Equation 3-5}$$

où s désigne la distance OA suivant l'axe du fil,

θ est l'angle d'inclinaison de cet axe par rapport à OA .

Afin de prendre en compte l'état de déformation du fil, Olofsson définit la courbure de l'axe par $\frac{d\theta}{ds}$. Après extraction du fil du tissu, il considère que le fil mémorise en partie la

déformation due à l'opération de tissage et définit alors une autre courbure initiale $\frac{d\theta_0}{ds_0}$.

Il est possible d'exprimer le moment M par l'expression suivante :

$$M = -E_b I \left(\frac{d\theta}{ds} - \frac{d\theta_0}{ds_0} \right) \quad \text{Equation 3-6}$$

où $E_b I$ représente la rigidité en flexion.

A partir de l'équation 3-4, pour $P=0$, $Q=0$, nous pouvons écrire $M=0$ et $\frac{d\theta_0}{ds_0} = \frac{d\theta}{ds}$

Olofsson introduit un terme appelé « facteur de forme » ψ tel que :

$$\frac{d\theta_0}{ds_0} = (1 + \psi) \frac{d\theta}{ds} \quad \text{Equation 3-7}$$

L'équation 3-6 devient alors :

$$M = E_b I \psi \left(\frac{d\theta}{ds} \right) \quad \text{Equation 3-8}$$

Le coefficient ψ se situe en -1 et 0 (-1 : pas de relaxation, les fils extraits du tissu sont parfaitement droits, 0 : relaxation complète, $\frac{d\theta_0}{ds_0} = \frac{d\theta}{ds}$).

Après analyse de son modèle, Olofsson fait différentes réserves. Dans un premier temps, il considère que la réaction du système se décompose en deux termes :

- le premier dû à la rigidité en flexion des fils,
- le second dû à leur rigidité en traction.

Ensuite, il considère que le facteur de forme facilite la résolution des équations d'équilibre. Dans le calcul, ψ est supposé constant. En réalité, il varie car la relaxation dépend essentiellement de l'historique du matériau.

Afin d'améliorer ce modèle, Grosberg [GROS 66] émet l'hypothèse que la résistance en flexion du tissu est constituée de deux composantes (une composante linéaire due à la résistance élastique, et une composante non linéaire due à la résistance de frottement entre les fibres.)

De plus, il considère que le comportement en flexion d'un tissu peut être décrit à partir d'un système multicouche dans lequel deux zones d'un même fil apparaissent, ces zones ayant des propriétés de rigidité et de frottement différentes :

- une zone dans laquelle la pression exercée entre les fibres est forte et les empêche de glisser les une par rapport aux autres,
- une zone dans laquelle la pression exercée entre les fibres est faible et permet en conséquence le glissement entre fibres et l'apparition de l'hystérésis dans le comportement en flexion du tissu.

Notons que peu d'auteurs ont pu mettre en évidence les effets d'hystérésis lors de la traction ou de la flexion d'un tissu.

3.2.3. Les modèles de Norris et de Schöck

Ces modèles concernent plus particulièrement les tissus enduits. Dans le cas de tissus enduits, Norris et Schöck [SCHO 89] ont ajouté aux modèles spatiaux une ou deux barres qui caractérisent les effets de l'enduction. Par exemple, dans le modèle de Norris (Figure I-3-4), les barres AB et CD appartiennent à l'enduction, et dans le modèle de Schöck (Figure I-3-5), c'est le ressort C qui la caractérise.

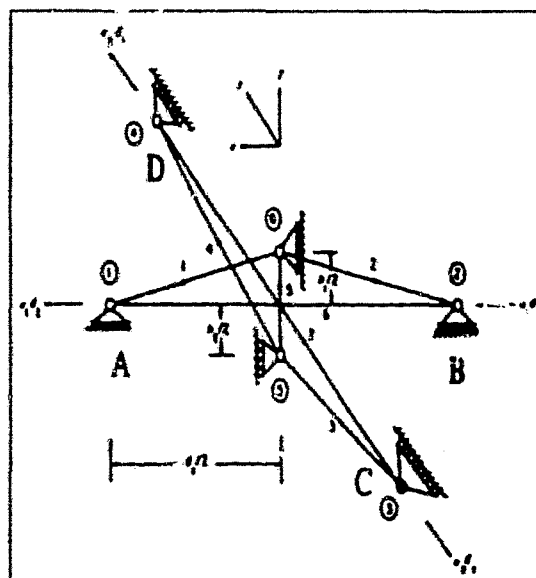


Figure I-3-4 Modèle de Norris

Il est nécessaire de souligner que tous les modèles précédents acceptent l'hypothèse d'homogénéisation c'est-à-dire que l'élément considéré est généralisable sur l'ensemble de la structure tissu..

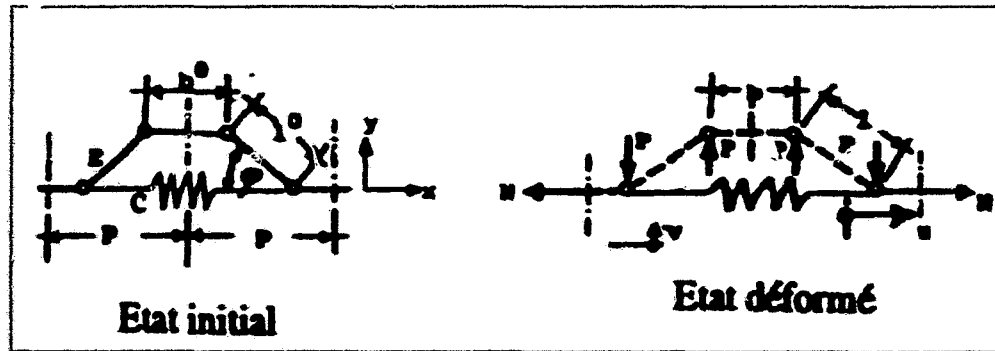


Figure I-3-5 Modèle de Schock

3.2.4. Le modèle de Abbott

Partant du modèle mécanique de Pierce, G.M. Abbott [ABBO 73] étudie la résistance élastique en flexion d'un tissu de type toile. Il considère, pour cela, successivement deux états du fil dans le tissu :

- le fil est non fixé ; il reprend son état d'avant tissage lorsqu'il est extrait du tissu,
- le fil est fixé ; il conserve son ondulation lorsqu'il est extrait du tissu.

De ces deux considérations, il déduit que la relaxation de la structure d'un tissu peut être vue comme la perte d'une partie de l'énergie élastique accumulée dans le système.

En outre, il établit le rapport entre la résistance élastique du tissu b et la résistance élastique du fil b_y , comme étant le rapport entre la distance, entre deux points de croisure consécutifs et la longueur d'un fil entre ces deux points (Figure I-3-6) :

$$\frac{b}{b_y} = \frac{p}{l_f} = \frac{p}{l - 2r\beta_0}$$

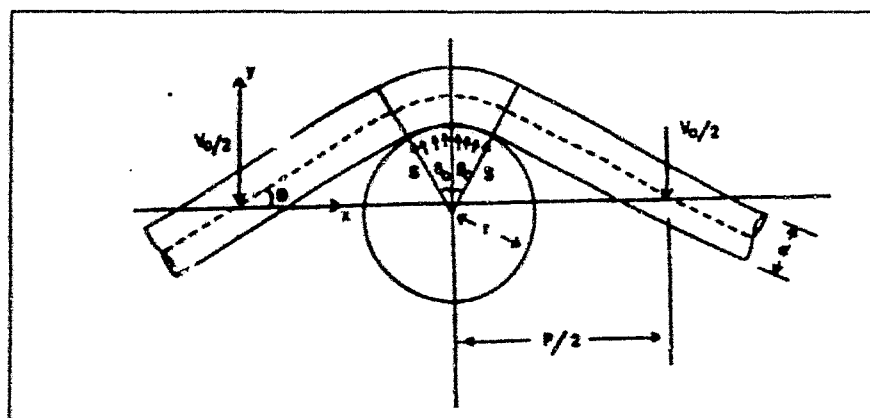


Figure I-3-6 Modèle de Pierce vu par G.M. Abbott

Les relations contrainte - déplacement des fils sont trouvées à partir de l'équation d'équilibre des forces aux nœuds et des relations géométriques du modèle. Cependant, il faut remarquer

qu'elles n'apparaissent pas sous forme explicite, mais constituent un système d'équations complexe.

3.2.5. Le modèle de Kawabata

Kawabata [KAWA 73] étudie la même structure de tissu que celle de Pierce, mais en donne une représentation différente (Figure I-3-7). Ainsi, il considère les fils sous forme de segments de droite fléchissant en deux points P_1 et P_2 sur l'axe perpendiculaire au plan du tissu. Ce modèle est proposé pour une sollicitation en traction bi axiale.

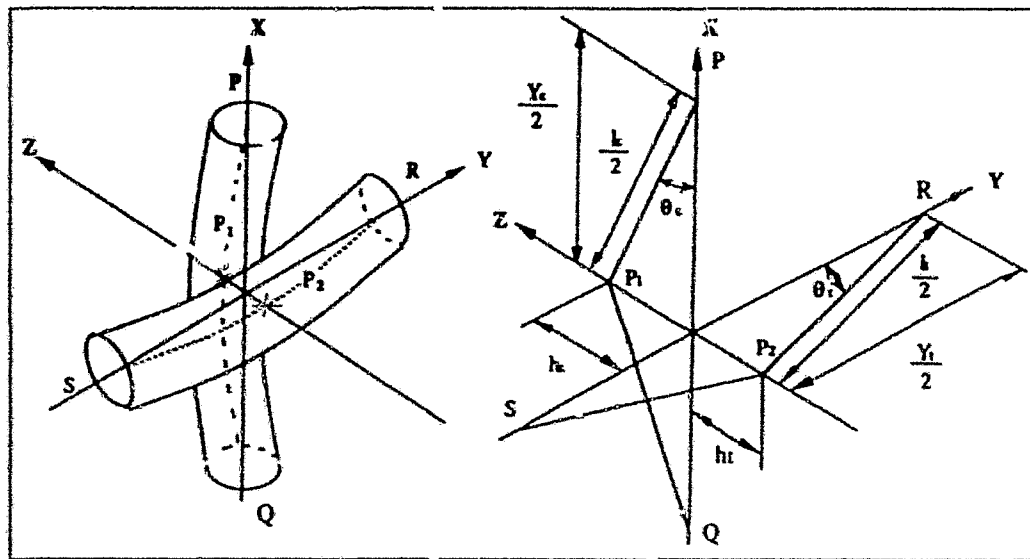


Figure I-3-7 Modèle de Kawabata avant déformation

Ainsi, sous les sollicitations de traction suivant X et Y , et en supposant les fils de chaîne et de trame parfaitement flexibles, il donne une représentation paramétrée de la déformation du point de croisure, telle qu'illustré la Figure I-3-8.

Cet état de déformation est défini de la manière suivante :

- A_1, A_2 symbolisent les propriétés de traction des fils de chaîne et de trame,
- B_1, B_2 représentent les propriétés de compression des fils de chaîne et de trame,
- λ est défini comme le rapport entre la longueur après déformation et la longueur avant déformation du segment,
- λ_c, λ_t sont les taux d'allongement des fils de chaîne et de trame,
- λ_x, λ_y sont les taux d'allongement du tissu suivant X et Y ,
- F_x, F_y sont les forces de traction suivant X et Y ,
- T_c, T_t sont les tensions dans les fils de chaîne et de trame,
- F_{co} est la force latérale de compression agissant suivant Z au point de contact.

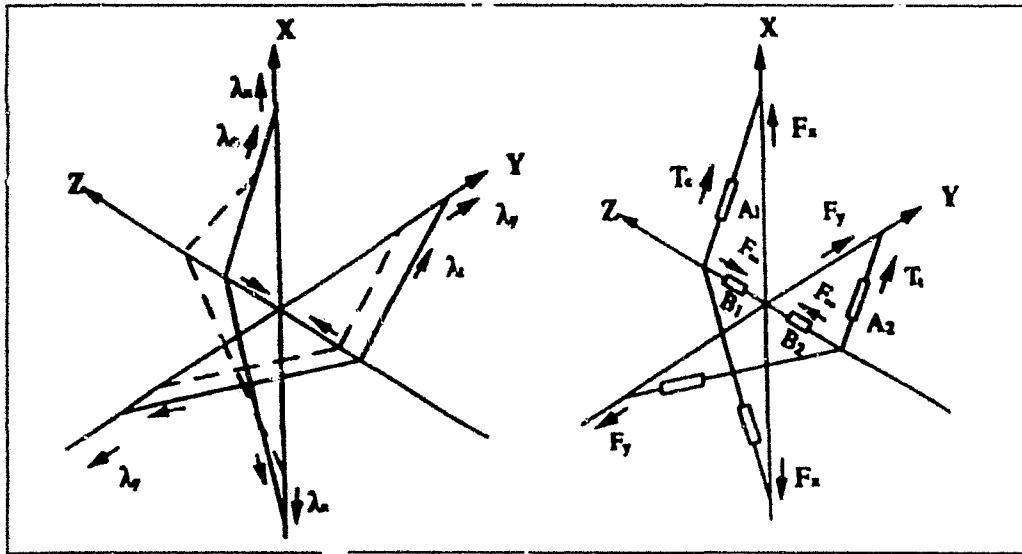


Figure I-3-8 Modèle de Kawabata après déformation

A partir de ce modèle, Kawabata déduit les équations relatives aux allongements dans les sens chaîne et trame. Il écrit les équations d'équilibre statique correspondant à l'état déformé de la structure unité de base. Pour cela, il utilise les représentations des propriétés en traction des fils de chaîne et de trame, et ce, à partir des propriétés d'extension du fil, et intègre le comportement en compression.

3.2.6. Le modèle de Breen

Plus récemment, Breen [BREEN 94] propose une approche à partir de la théorie des modèles à particules. Il modélise le tissu comme un maillage de particules, chaque particule représentant un point de croisure entre la chaîne et la trame dans une armure toile (figure I-3-9). Il émet l'hypothèse que la résultante des actions sur la particule est telle que, pour chaque point de croisure, le fil de trame reste en contact avec le fil de chaîne. Chaque particule est définie par une fonction d'énergie représentant les variations de niveau des contraintes. Cette fonction d'énergie au nœud i s'écrit :

$$U_i = U_{repel\ i} + U_{stretch\ i} + U_{bend\ i} + U_{trellis\ i} + U_{grav\ i} \quad \text{Equation 3-9}$$

Dans cette équation apparaît :

- $U_{repel\ i}$: énergie artificielle de répulsion garantissant la géométrie de la structure,
- $U_{stretch\ i}$: énergie de tension de la particule par rapport à ses quatre particules voisines,
- $U_{bend\ i}$: énergie due à la flexion des fils hors du plan local du tissu,
- $U_{trellis\ i}$: énergie due à la flexion d'un fil sur l'autre au point de croisure,

- $U_{grav i}$: énergie potentielle due à la gravité.

On peut constater que l'auteur tient compte de l'encombrement des fils (les uns par rapport aux autres) par la fonction $U_{repel i}$. De plus, il intègre dans son modèle les lois de comportement du matériau en traction et en flexion, lois qu'il obtient à l'aide de quelques tests de tissu sur la chaîne de mesure KES (Kawabata's Evaluating System).

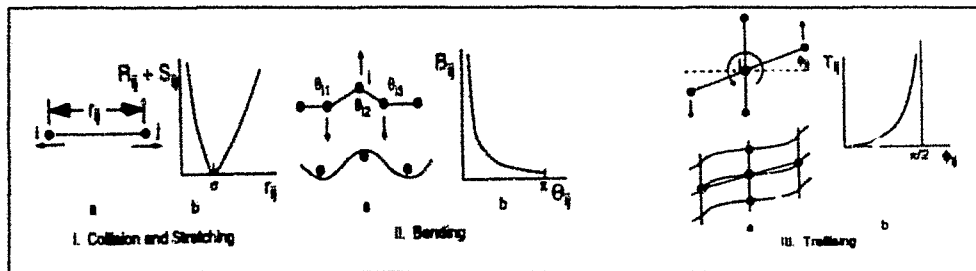


Figure I-3-9 Modèle de Breen

Cependant, ce modèle est développé uniquement pour simuler le drapé statique d'un tissu. De plus, l'auteur admet que les temps de calcul restent extrêmement longs.

3.2.7. Le modèle de Taylor

Ce modèle concerne exclusivement les tissus sous sollicitations de déchirure [WU 92]. L'auteur procède à une analyse du phénomène de déchirure. Dans ce contexte, plusieurs fils contribuent à l'évolution de la déchirure avec des états de déformation différents. Au fur et à mesure du déchirement, ces fils atteignent successivement le point de rupture. En conséquence, la résistance de déchirement du tissu est proportionnelle à la résistance du fil le constituant. Le nombre de fils contribuant à ce phénomène dépend de la structure du tissu. Dans le cas du déchirement amorcé, Taylor analyse la zone triangulaire au point A : (cf. Figure I-3-10).

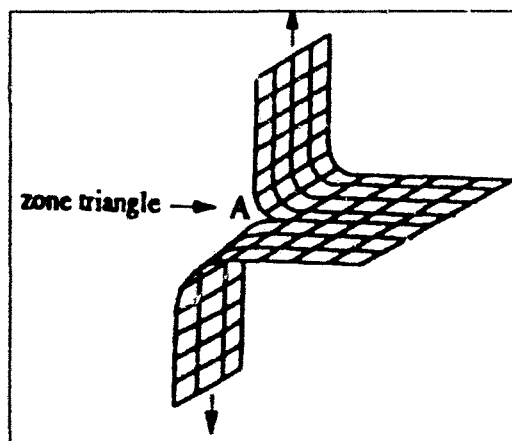


Figure I-3-10 Zone triangulaire en déchirement amorcé

Il explique le phénomène en considérant le fil auquel appartient le point A situé à la position de plus grande déformation et soumis à une force de traction T . Lorsque T augmente, les fils perpendiculaires au fil de A glissent par rapport à celui-ci, et se rapprochent les uns des autres jusqu'à rupture du fil de A . Alors, la force T a atteint la résistance de rupture du fil de A . Après cette rupture, le même cycle reprend sur le fil de A' suivant.

Il faut signaler que dans cette analyse, Taylor fait beaucoup de simplifications. Pourtant, cette analyse permet de résoudre le problème de déchirement amorcé d'un tissu.

3.2.8. Le modèle de Postle et Jong

Les méthodes énergétiques peuvent être largement utilisées pour résoudre des problèmes mécaniques complexes. C'est le principe du minimum d'énergie qui est utilisé dans ce cas pour rechercher l'état d'équilibre du tissu. Ces méthodes ne peuvent s'appliquer que sur des structures élastiques.

Dans un tissu relaxé, les fils s'organisent de telle sorte que l'énergie du système soit minimale, compte tenu bien sûr des contraintes de frottement. Ainsi, lors d'une déformation, la structure tend vers un état d'énergie minimale, dans lequel les forces et les couples sont en équilibre mécanique.

La mise en œuvre d'une méthode énergétique consiste en l'identification et la formulation de toutes les contributions individuelles de l'énergie d'un système. En appliquant ce principe à l'étude de déformation des structures textiles, on aura quatre termes d'énergie de déformation [POST 81] :

- énergie de flexion des fils,
- énergie de torsion des fils,
- énergie de compression latérale des fils,
- énergie d'extension longitudinale des fils.

Puisque l'énergie est une quantité scalaire, l'énergie totale de déformation d'une armure peut être exprimée par la somme des termes partiels pour chaque fil de celle-ci :

$$E = \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} (E_b + E_r + E_c + E_t) ds \quad \text{Equation 3-10}$$

où E_b , E_r , E_c , E_t sont respectivement l'énergie de flexion, de torsion, de compression et de traction par unité de longueur du i -ème élément de la structure, où l_i est la longueur du i -ème élément et où ds désigne l'abscisse curviligne.

Les énergies linéiques de flexion et de torsion par unité de longueur de fil peuvent être exprimées comme suit :

$$E_b = B \frac{\kappa^2}{2}, E_r = G \frac{\theta^2}{2} \quad \text{Equation 3-11}$$

où B et G sont respectivement la rigidité en flexion et en torsion,
 κ et θ sont le rayon de courbure totale et la torsion totale.

L'énergie linéique de compression latérale est exprimée par :

$$E_c = C g(r) \quad \text{Equation 3-12}$$

où C est la rigidité en compression latérale,
 $g(r)$ est une fonction de la distance r entre les fils, de forme générale :

$$g(r) = \frac{r_0}{r} a \quad \text{Equation 3-13}$$

avec a : indice de compression ($5 < a < 30$).

D'après l'Equation 3-13, il semble que l'énergie linéique de compression ne dépende que de la distance r . En fait, le terme a est une fonction qui traduit entre autre l'effet de la tension longitudinale du fil. Dans tous les cas où la structure n'est soumise qu'à de faibles contraintes, la composante énergétique de compression est faible et l'indice de compression a peut être considéré comme une constante.

3.2.9. Le modèle de Provot

Afin de définir son modèle qui concerne le rendu réaliste de drapé, Provot [PROV 97] se pose tout d'abord la question de savoir à quelle échelle il effectue la modélisation. Ainsi, estime-t-il que l'échelle des lois de la mécanique n'est pas adaptée au drapé. Plus particulièrement, il considère que la physique conduit à une structure de calcul trop lourde, pour une application en infographie.

Il propose une modélisation du tissu sous la forme d'un système « masse ressort », s'appuyant sur une discrétisation qui dépend uniquement du réalisme souhaité. Ce maillage est représenté Figure I-3-11.

A chaque point massique, l'auteur adapte fortement le Principe Fondamental de la Dynamique. Afin de diminuer le temps de calcul, il développe une théorie pour éviter les problèmes posés par la super élasticité. La super élasticité se caractérise par une élasticité

linéaire aux grandes déformations et conduit à la concentration des déformations dans des zones réduites.

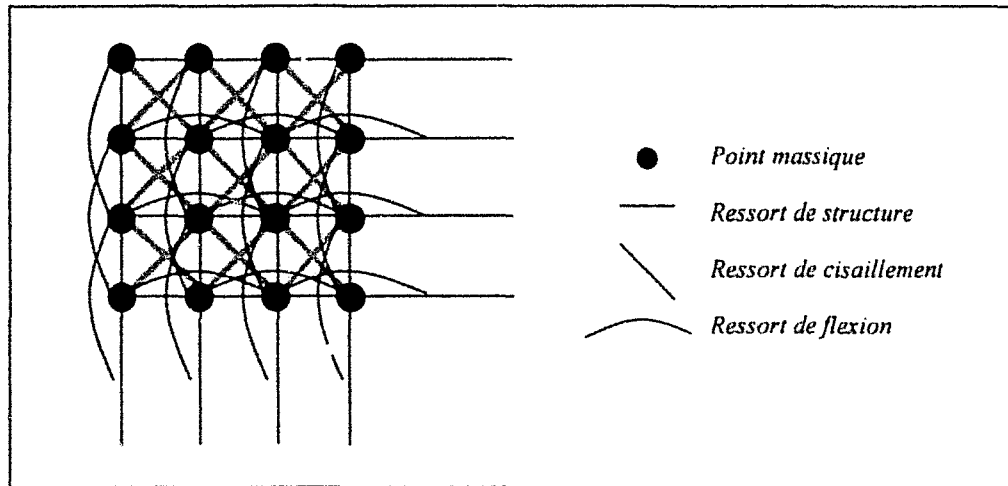


Figure I-3-11 Modèle de Provot

Cependant, l'inconvénient majeur de ce modèle est que rien ne permet, dans l'étude, de définir le maillage optimal. Provot trouve un compromis entre temps de calcul et finesse du maillage, sans donner le critère d'optimisation de ce dernier. De plus, il se limite à de faibles sollicitations et ne traite que des tissus soumis à l'effet de leurs propres poids. Il n'indique pas non plus les moyens mis en œuvre pour identifier les paramètres de son modèle. Ce modèle n'est donc pas adapté à l'approche que nous souhaitons développer.

4. Modèles de fil

Les travaux sur la modélisation du fil sont peu nombreux. Les études sur le fil portent sur une modélisation prise à une échelle différente de la nôtre, c'est à dire que les auteurs s'intéressent plus à l'interface fil /fibre.

Les premiers travaux ayant pour objectif de créer le lien entre le fil et le tissu ont été menés par notre équipe de recherche en 1997 [GHIT 97]. L'objectif de ses travaux est de modéliser le tombé d'un fil fixé par l'une de ses extrémités. (Figure I-4-1) Les auteurs résolvent la dynamique de leur système par l'intermédiaire des équations de Lagrange associées aux coordonnées et forces généralisées. Cette représentation s'écrit sous la forme :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}_i} \right) - \left(\frac{\delta T}{\delta \alpha_i} \right) = Q_i$$

où,

T : représente l'énergie cinétique

α_i : définissent les coordonnées généralisées

Q_i : traduit les forces généralisées

Lorsque les forces généralisées dérivent d'un potentiel, l'équation de Lagrange s'écrit sous la forme :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}_i} \right) - \left(\frac{\delta T}{\delta \alpha_i} \right) = \frac{\delta U}{\delta \alpha_i} + Q'_i$$

dans laquelle,

U : représente l'énergie potentielle

Q'_i : décrit les forces généralisées ne dérivant pas de l'énergie potentielle

La figure I-4-12 représente le modèle du fil à n degrés de liberté. La masse m_i du fil est considérée ponctuelle et est ramenée au point M_i . Dans une première phase, les auteurs décrivent le problème dans le cas d'un système à 2 degrés de liberté, l'énergie cinétique et l'énergie potentielle s'écrivent respectivement:

$$T = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + l_2^2 \dot{\alpha}_2^2 + 2 l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1))$$

$$U = m_1 g l_1 \cos(\alpha_1) + m_2 g l_1 \cos(\alpha_1) + m_2 g l_2 \cos(\alpha_2)$$

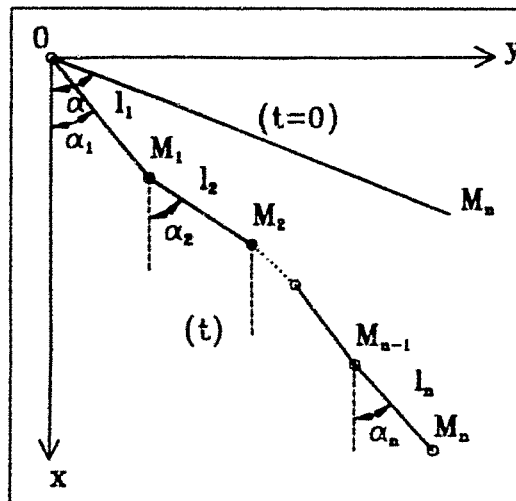


Figure I-4-1 Modèle pendulaire

Ils mettent en jeu deux types de forces généralisées : l'un est relatif aux coordonnées α_1 ($Q'_1 = -h l_1 \dot{\alpha}_1$) où h est le frottement visqueux, l'autre est relatif aux coordonnées α_2 ($Q'_2 = -h (l_2 \dot{\alpha}_2 + l_1 \dot{\alpha}_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1))$). Les équations sont ensuite généralisées à n degrés de liberté afin de tenir compte de l'ensemble des barres représentant le modèle. Cette modélisation nous paraît intéressante car elle correspond à l'esprit de notre travail. Par contre,

nous pouvons regretter le manque de souplesse d'implémentation de ce type de modèle, ainsi que le peu de paramètres mécaniques intervenant dans la modélisation. En effet, seuls les coefficients relatifs à la masse m et au frottement visqueux h apparaissent.

5. L'approche proposée

5.1. Objectifs

Comme nous l'avons déjà précisé précédemment, notre équipe s'est proposé de modéliser le tissu afin de prédire les comportements mécaniques de Textiles à usage Techniques. Le résultat pourra prendre la forme d'un logiciel de CAO TuT.

L'objectif de la thèse se situe en amont de ce logiciel de CAO TuT. Il consiste, en effet, sur la base de l'étude bibliographique, à établir un modèle simple de tissu en partant des caractéristiques des fils le constituant et de sa géométrie. De plus, ce modèle doit être ouvert afin de permettre toute évolution permettant d'intégrer les développements futurs de l'équipe.

5.2. Approche

Le schéma de la Figure I-5-1 illustre la démarche que nous envisageons.

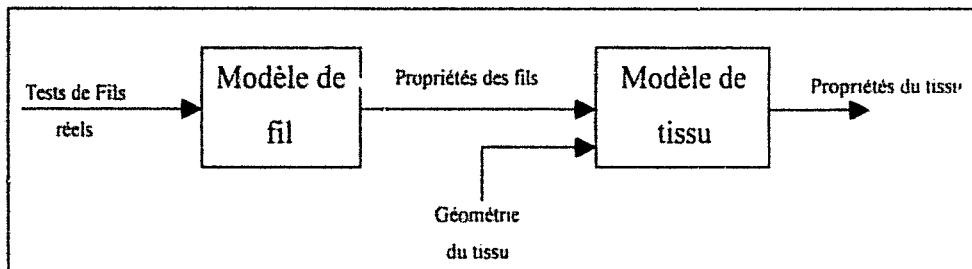


Figure I-5-1 Objectif de l'étude

Dans un premier temps, nous définissons le modèle de fil permettant de déduire les caractéristiques mécaniques et géométriques de celui-ci à partir de tests réels. Dans un second temps, nous envisageons d'ajouter aux caractéristiques du fil un ensemble de caractéristiques propres au tissu : armure, retrait, embuvage, réductions. Toutes ces informations seront ensuite intégrées dans le modèle de tissu présenté dans ce mémoire. Il sera alors possible de simuler le comportement du tissu sans même l'avoir fabriqué pour une application donnée.

Le tissu étant un entrecroisement de fils, le modèle choisi intègre une partie géométrique pour décrire cet entrecroisement et pour prendre en compte les contraintes géométriques. Une

partie mécanique complète ce modèle et intègre les lois de comportement sous sollicitations des fils.

De plus, nous avons adopté un modèle appelé dans la littérature « force géométrie » qui garantit un aspect évolutif, dans lequel les sollicitations mécaniques sont introduite par utilisation du principe de superposition.

Contrairement aux méthodes utilisant les Eléments Finis, notre approche permet de prendre en compte toute nouvelle composante (nouvelle sollicitation, nouvelle conditions aux limites, etc.).

Ce modèle combine les modèles proposés par Kawabata, Olofsson, Grosberg, ou Breen, qui au vue de la bibliographie n'ont jamais été testés sous la forme que nous proposons, c'est-à-dire sous la forme d'essais de simulation d'un tissu. Par ailleurs, en utilisant comme élément de base le point de croisure, nous réalisons effectivement le changement d'échelle du fil au tissu.

Enfin, contrairement à la plupart des modèles succinctement présentés dans la bibliographie, nous ne nous limitons pas à la définition des propriétés des fils utilisés, nous proposons des méthodes de mesure permettant d'identifier les paramètres inconnus de notre modèle.

Chapitre II

Modèles de fil et de tissu

Modèles de fil et de tissu	31
1. Introduction	31
2. Modèle de Fil	31
2.1. Partie géométrique	31
2.2. Partie mécanique	33
3. Modèle de Tissu	37
3.1. Introduction	37
3.2. Géométrie générale	37
3.3. Géométrie de l'Elément de base	39
3.4. Mécanique de l'Elément de base	40
4. Méthodes d'intégration et d'optimisation	44
4.1. Intégration du système dynamique	44
4.2. Propagation et optimisation des calculs	46
4.2.1. Propager l'onde mécanique : méthode des rangs	46
4.2.2. Améliorer le temps de calcul : méthode du multi-échantillonnage	47
4.2.3. Améliorer le temps de calcul : méthode prédictive	48
4.3. Mise en œuvre	52
5. Conclusion	53

Modèles de fil et de tissu

6. Introduction

Il est important de rappeler que l'objectif de l'étude est de prédire le comportement d'un Fil à partir de la seule connaissance de sa géométrie et des propriétés des fils le constituant. Pour cela, il nous est nécessaire de connaître parfaitement le comportement d'un fil soumis à diverses sollicitations, et en particulier, aux sollicitations que subit et transmet le fil dans la structure même du tissu. Ces remarques entraînent le développement de deux modèles : l'un porte sur la modélisation du fil, l'autre sur la modélisation du tissu. Afin de tenir compte des contraintes imposées par le changement d'échelle, c'est-à-dire par le passage de l'échelle du fil à l'échelle du tissu, il a été nécessaire de développer une stratégie d'étude bien précise conduisant à des modèles complémentaires. Le modèle de tissu doit intégrer le modèle de fil. Ceci implique que les paramètres du fil sont les paramètres du modèle du tissu.

Cette contrainte conduit à considérer les deux modèles de manière interactive. Le lien entre le modèle du fil et le modèle du tissu conduit nécessairement à modifier l'un dès que l'autre est modifié et les améliorations de l'un conduisent implicitement à l'amélioration de l'autre. Les deux modèles sont pensés comme complémentaire et indissociables.

Ce chapitre présente le modèle de fil et le modèle de tissu. Chacun d'eux est composé d'une partie géométrique et d'une partie mécanique. Ils sont, en effet, basés sur une approche « force-géométrie ».

7. Modèle de Fil

7.1. Partie géométrique

L'analyse d'un matériau tissé montre qu'un tissu est composé de fils de chaîne et de fils de trame entrecroisés. Les formes géométriques que prennent les fils de chaîne par rapport au fil de trame définissent l'armure. La figure II-2-1 présente une armure simple de type toile. Les

premiers travaux de modélisation du tissu sont effectués par rapport à cette armure, la plus communément utilisée.

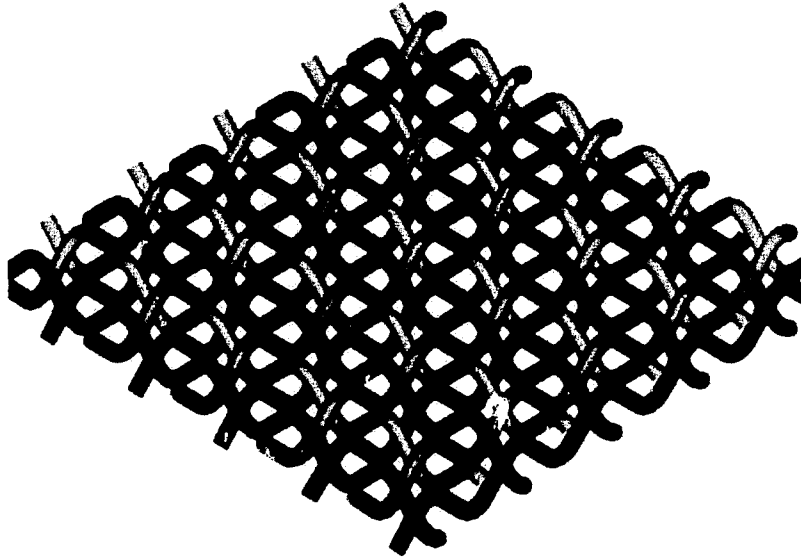


Figure II-2-1: Détail de la structure d'un tissu de type toile

Dans une première approche, cette structure peut être assimilée à un système « masse – segment », c'est-à-dire, un système composé de segments reliant des masses entre-elles (Figure II-2-2).

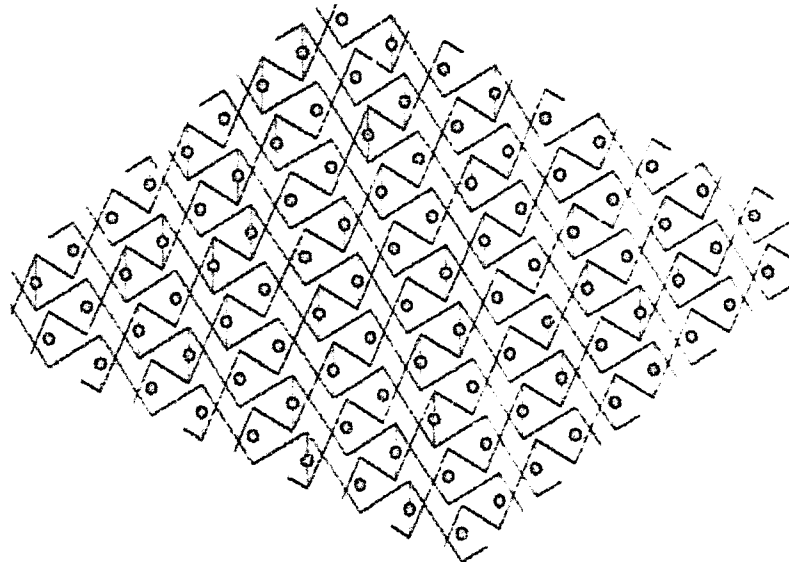


Figure II-2-2: Maillage du tissu de type toile

Afin de respecter la compatibilité entre les modèles fil et tissu, il est nécessaire de choisir un modèle du fil représenté par un assemblage de segments jointifs (Figure II-2-3). Ces segments, sans masse, représentent la direction locale que prend le fil entre deux points de croisure. Chaque extrémité de ces segments est pondérée par une masse ponctuelle μ_k , qui

correspond à la masse des deux bouts de fil symbolisés par les deux demi segments voisins du nœud M_k . Dans cette étude, il est conférée à chaque segment une capacité à se déformer de manière statique et dynamique, et ce, uniquement en traction.

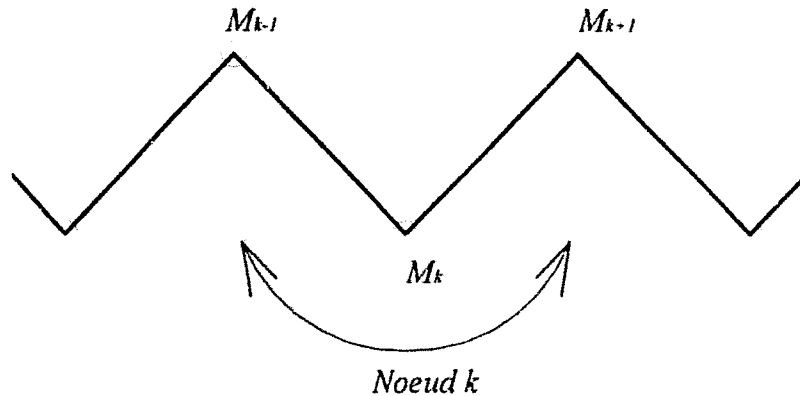


Figure II-2-3 : Modèle de base du fil

L'utilisation de ce modèle nécessite de définir l'état initial de chaque segment. Cet état est défini par une longueur et une orientation. Ces données traduisent la géométrie du fil dans un espace à trois dimensions. Les conditions initiales de la géométrie des fils dans le cas d'un tissu sont précisées dans la section II-3-2. Elles sont indispensables pour traduire géométriquement l'armure.

7.2. Partie mécanique

La dynamique de la structure géométrique du fil est décrite par une analyse mécanique. L'inventaire des sollicitations intervenant à chaque nœud est nécessaire pour connaître la dynamique du fil. Les sollicitations susceptibles de modifier celle-ci sont :

- forces de pesanteur,
- forces de traction longitudinale,
- phénomènes de flambage,
- forces de compression transversale,
- forces de flexion,
- forces de torsion,
- phénomènes de frottement et de glissement.

L'objectif de l'étude est de mettre au point un modèle utilisant uniquement des paramètres accessibles par la mesure. Aussi, les sollicitations difficilement mesurables sont, pour le moment, écartées. C'est le cas notamment des effets de flambage, de torsion, de frottement et de glissement. Ceci conduira à définir, lors de la validation du modèle, des domaines

d'utilisation. Cette validation se fera par comparaison de simulation du modèle avec tests réels. Ainsi, le principe que nous nous sommes fixé est que la prise en compte d'un nouveau comportement mécanique doit nécessairement être identifiable et donc nécessiter la mise au point d'un dispositif expérimental de mesure.

Dans ces conditions, la liste précédente peut être simplifiée comme suit :

- Une force de pesanteur,
- Des forces de traction longitudinale,
- Une force de flexion,
- Une force due à la viscosité de l'air.

Pour être complet dans cette analyse des sollicitations sur un fil, la résultante des forces de contact $\vec{F}_{ext, k}$ au nœud M_k doit être rajoutée. (cf. Figure II-2-5)

Après ce bilan succinct des forces agissant sur un nœud, il est nécessaire de détailler chacune d'elles par une représentation mathématique pour mettre en place le modèle.

Pour ce faire, il est nécessaire, tout d'abord, de définir les différents symboles utilisés ; considérons pour cela la Figure II-2-4.

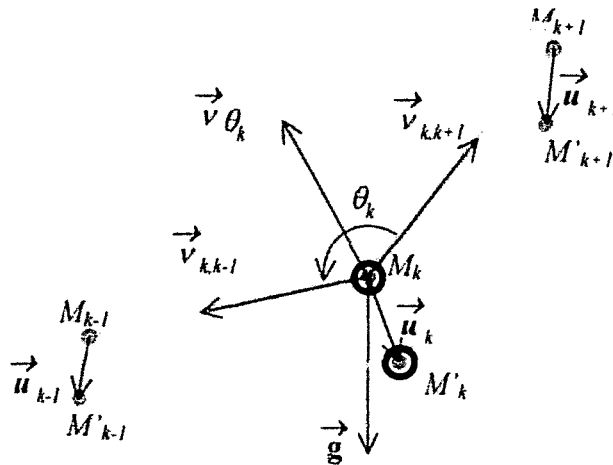


Figure II-2-4 : Définition des notations utilisées

- μ_k masse associée au nœud M_k ,
- θ_k angle entre les deux segments M_kM_{k-1} et M_kM_{k+1} ,
- ν_k coefficient de frottement visqueux à l'air au nœud M_k ..
- $\vec{v}_{k,k-1}$ vecteur unitaire associé à la segment entre les nœuds M_k et M_{k-1} .

$\vec{v}_{k,k+1}$	vecteur unitaire associé à la segment entre les nœuds M_k et M_{k+1} ,
$\vec{v}_{\theta_k}$	vecteur porté par la bissectrice intérieure de l'angle θ_k ,
$\vec{u}_k$	déplacement du nœud M_k ,
$\vec{u}_{k-1}$	déplacement du nœud M_{k-1} ,
$\vec{u}_{k+1}$	déplacement du nœud M_{k+1} ,
$\xi_{k,k-1}$	allongement de la barre $M_k M_{k-1}$ résultant des déplacements $\vec{u}_k$ et $\vec{u}_{k-1}$,
$\xi_{k,k+1}$	allongement de la barre $M_k M_{k+1}$ résultant des déplacements $\vec{u}_k$ et $\vec{u}_{k+1}$,
f_{tr}	modèle de représentation du comportement en traction du fil,
g_{fl}	modèle de représentation du comportement en flexion du fil,
$\vec{g}$	pesanteur terrestre,

Selon ces notations, il est possible d'expliciter les relations mathématiques entre la géométrie et les comportements mécaniques considérés.

Le vecteur unitaire $\vec{v}_{k,k-1}$ s'écrit sous la forme :

$$\vec{v}_{k,k-1} = \frac{\vec{M}_k \vec{M}_{k-1}}{\|\vec{M}_k \vec{M}_{k-1}\|}$$

et le vecteur unitaire $\vec{v}_{\theta_k}$ s'écrit sous la forme :

$$\vec{v}_{\theta_k} = \frac{\vec{v}_{k,k-1} + \vec{v}_{k,k+1}}{\|\vec{v}_{k,k-1} + \vec{v}_{k,k+1}\|}$$

Si $\vec{v}_{k,k-1} + \vec{v}_{k,k+1} = \vec{0}$, $\vec{v}_{\theta_k}$ se déduit de $\vec{v}_{k,k-1}$ par un rotation de $+\frac{\pi}{2}$.

Considérant la masse constante μ_k , la force de pesanteur $\vec{P}$ s'écrit :

$$\vec{P} = \mu_k \vec{g}.$$

Le comportement en traction de la barre $M_{k-1} M_k$ s'allongeant de $\xi_{k,k-1}$, conduit à une force de

réaction $\vec{F}_{tr,k,k-1}(\vec{u}_k, \vec{u}_{k-1})$ portée par $\vec{v}_{k,k-1}$ telle que :

$$\vec{F}_{tr, k, k-1}(\vec{u}_k, \vec{u}_{k-1}) = f_{tr}(\xi_{k, k-1}) \vec{v}_{k, k-1}$$

Pour traduire l'effet des deux moments de flexion s'exerçant en M_{k-1} et M_{k+1} , il est proposé une force $\vec{F}_{fl, k}(\theta_k)$ en M_k , expression des éléments de réductions du torseur glisseur (moment nul en M_k) équivalent en M_k . Alors, pour tout angle θ_k au nœud M_k , cette force $\vec{F}_{fl, k}(\theta_k)$ portée par le vecteur unitaire $\vec{v}_{\theta_k}$ est telle que :

$$\vec{F}_{fl, k}(\theta_k) = g_{fl, k}(\theta_k) \vec{v}_{\theta_k}$$

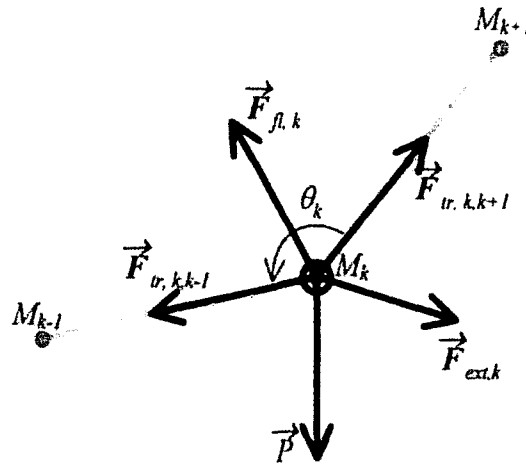


Figure II-2-5 : Forces sur un nœud

La Figure II-2-5 donne une représentation graphique de l'ensemble des forces précédemment énumérées. Le Principe Fondamentale de la Dynamique est ensuite appliqué à chaque nœud M_k pour traduire la dynamique de la structure géométrique et massique, et définir finalement la partie mécanique du modèle fil. Ceci nous conduit au système d'équations suivant pour le nœud M_k :

$$\vec{R}^* = \mu_k \frac{d^2 \vec{u}_k}{dt^2} + \nu_k \frac{d \vec{u}_k}{dt} + \vec{H}(\vec{u}_k) \quad (1)$$

avec

$$\vec{R}^* = \mu_k \vec{g} + \vec{F}_{ext, k} \quad (2)$$

et

$$\vec{H}(\vec{u}_k) = \vec{F}_{tr, k, k-1}(\vec{u}_k, \vec{u}_{k-1}) + \vec{F}_{tr, k, k+1}(\vec{u}_k, \vec{u}_{k+1}) + \vec{F}_{fl, k}(\theta_k) \quad (3)$$

$\vec{H}(\vec{u}_k)$ n'est pas forcément linéaire par rapport à $\vec{u}_k$, c'est pourquoi l'équation (1) est considérée comme non linéaire. Les équations (1), (2) et (3) traduisent le mouvement d'un nœud dans un fil. L'équation (1) traduit la dynamique du système, les équations (2) et (3) expriment la résultante des forces en fonction des coordonnées actuelles du nœud considéré et des caractéristiques mécaniques affectées aux éléments de liaison.

Pour simplifier les notations, on note $\vec{F}_{tr, k, k-1}(\vec{u}_k, \vec{u}_{k-1}) = \vec{F}_{tr, k, k-1}$ et $\vec{F}_{fl, k}(\theta_k) = \vec{F}_{fl, k}$

8. Modèle de Tissu

8.1. Introduction

Cette section comporte trois volets. Le premier définit la structure du tissu et explicite comment il est possible de traduire n'importe quelle armure par de simples considérations géométriques. La discrétisation spatiale concrétise et définit la partie géométrique du modèle. Le deuxième volet établit le bilan des forces engendrées dans les différents points de croisure, entre les fils de chaîne et les fils de trame. Le dernier volet permet de traduire la dynamique de chaque élément de base dans le tissu, en utilisant le Principe Fondamental de la Dynamique. Ces deux derniers volets correspondent à la partie mécanique du modèle.

8.2. Géométrie générale

La géométrie est établie à partir du fait qu'un tissu est obtenu par l'entrecroisement, selon un mode de liage choisi, de fils de chaîne et de fils de trame. 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 représentée par un segment conformément au modèle de fil défini précédemment.

Considérons un tissu à $m \times n$ points de croisure. Il peut être représenté comme un maillage de $m \times n$ nœuds élémentaires (Figure II-3-1), en considérant que chaque nœud est relié à ses quatre voisins (connexité 4) par quatre segments sans masse. Le nœud élémentaire représente le point de croisure entre un fil de chaîne et un fil de trame.

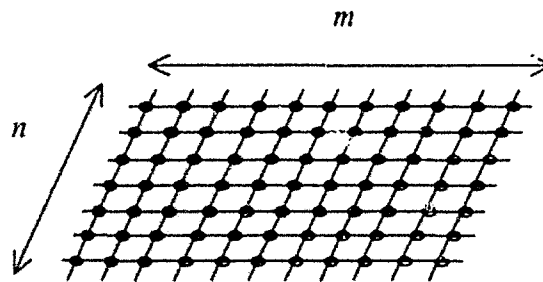


Figure II-3-1 : Le maillage du tissu

Cette architecture traduit de manière générale l'armure d'un tissu. En prenant l'exemple simple de l'armure toile (Figure II-3-2) nous pouvons constater que le choix d'un modèle basé sur le système « masse - segment » reflète bien la réalité.

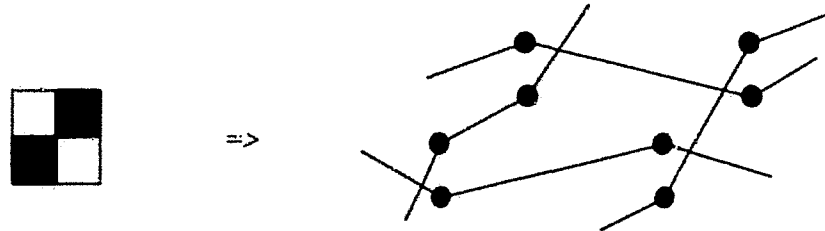


Figure II-3-2 : L'armure toile

Il en est de même pour l'exemple d'une armure de type sergé de 3 (Figure II-3-3).

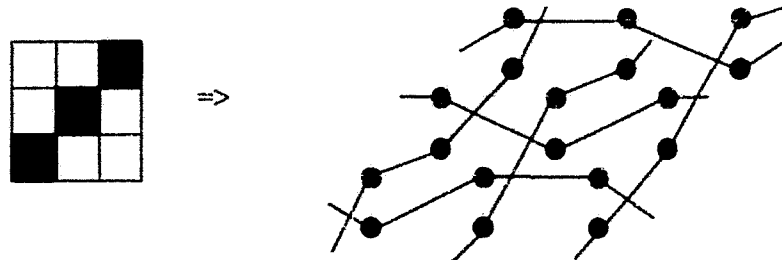


Figure II-3-3 : L'armure sergé de 3

Cependant, la géométrie d'un tissu ne s'arrête pas qu'à la définition de son armure. Il est important d'inclure les paramètres de fabrication propre au tissage que sont le retrait (trame) et l'embuvage (chaîne), ainsi que le titre du (des) fils(s) constituant(s) le tissu. La notion de retrait / embuvage (notés Ret et Emb) définie à partir des dimensions L_1 , L_2 et L'_1 , L'_2 (Figure II-3-4) se traduit par les expressions suivantes :

$$Ret = \frac{L_2 - L_1}{L_2} \% \quad \text{et} \quad Emb = \frac{L'_2 - L'_1}{L'_2} \%$$

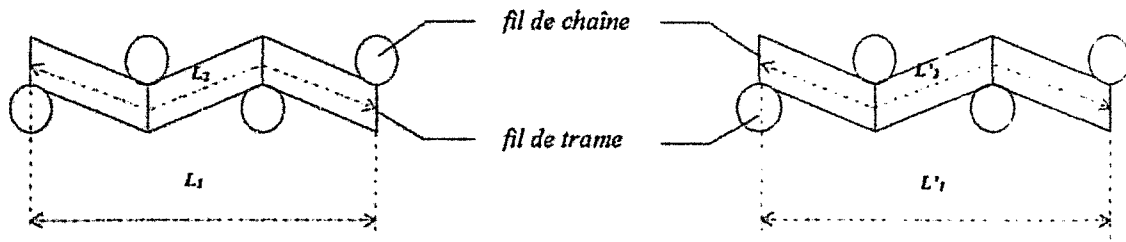


Figure II-3-4 : La géométrie de conception

Soit d_{ch} d_{tr} : densité du fil de chaîne, du fil de trame,
 T_{ch} T_{tr} : titre en Tex (g/km) du fil de chaîne, du fil de trame.
 r_{ch} r_{tr} : rayon du fil de chaîne, du fil de trame

De la Figure II-3-4, on peut déduire :

$$L_2^2 = L_1^2 + (2*r_{ch})^2 \quad \text{et} \quad L_2'^2 = L_1'^2 + (2*r_{tr})^2$$

De ces équations, se déduisent L_1 , L_2 qui s'expriment en fonction de r_{ch} , Ret ,

et se déduisent L_1' , L_2' qui s'expriment en fonction de r_{tr} , Emb :

$$L_2 = \frac{L_1}{1-Ret} \quad \text{et} \quad L_2' = \frac{L_1'}{1-Emb}$$

$$\text{et} \quad L_1 = \frac{(2*r_{ch})}{\sqrt{\left(\frac{1}{1-Ret}\right)^2 - 1}} \quad \text{et} \quad L_1' = \frac{(2*r_{tr})}{\sqrt{\left(\frac{1}{1-Emb}\right)^2 - 1}}$$

$$\text{avec} \quad r_{ch} = \sqrt{\frac{T_{ch}}{\pi*d_{ch}}} \quad \text{et} \quad r_{tr} = \sqrt{\frac{T_{tr}}{\pi*d_{tr}}}$$

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 sa discrétisation spatiale. Ainsi, tout tissu, quelle que soit son armure, peut être représenté par un réseau de l'élément de base.

8.3. Géométrie de l'Elément de base

C'est dans la définition de la géométrie de l'élément de base du modèle de tissu que se fait la liaison entre le modèle de fil et le modèle de tissu. La géométrie de l'élément de base, permettant le maillage du tissu, est décrite par deux nœuds et quatre barres comme représenté en figure II-3-5.

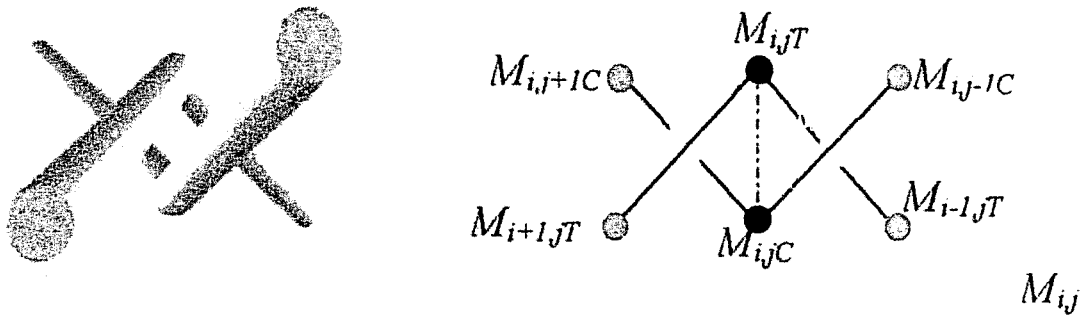


Figure II-3-5 : Le nœud élémentaire

Le nœud tissu M_{ij} , composé des deux nœuds fil M_{ijC} et M_{ijT} de masse respective μ_{ijC} et μ_{ijT} , correspond au point de croisure d'un fil de chaîne avec un fil de trame. Ce nœud M_{ij} est considéré comme indéformable, selon l'hypothèse de non glissement entre le fil de chaîne et le fil de trame. Le nœud M_{ijT} est situé sur un fil de trame et possède la masse des deux demi barres de trame μ_{ijC} . Le nœud M_{ijC} est situé sur un fil de chaîne et possède la masse des deux demi barres de chaîne μ_{ijT} .

Le maillage du tissu à l'aide de cet élément de base en 3D, conduit à une représentation en 2D.

8.4. Mécanique de l'élément de base

L'Elément de base considéré dans ce modèle de tissu est constitué de deux nœuds tels que définis dans le modèle de fil. Aussi, les mêmes types de contraintes apparaissent :

- forces de pesanteur,
- forces de contact,
- forces de traction longitudinale,
- phénomènes de flambage,
- forces de compression transversale,
- moments de flexion,
- forces de torsion,
- phénomènes de frottement et de glissement.

Dans cette liste, les forces extérieures sont dues, pour partie, à l'interaction des fils les uns sur les autres et sont dénommés forces d'encombrement.

A partir des hypothèses émises sur le modèle de fil, les sollicitations retenues sont alors :

- des forces de contact,
- deux forces de pesanteur,
- quatre forces de traction longitudinale,
- deux forces de flexion,
- des forces d'encombrement.

Explicitons maintenant la méthode qui permet de tenir compte des sollicitations sur le nœud élémentaire de tissu et donc d'en définir le comportement dynamique. Les quatre barres du nœud ne travaillent qu'en traction. Elles sont articulées entre elles par des liaisons de type rotule (Figure II-3-6). Ce type de liaison autorise toutes les rotations mais interdit tous les déplacements. De la même façon que pour le modèle fil, les moments de flexion sont traduits par des forces correspondant à la résultantes des torseurs équivalents.

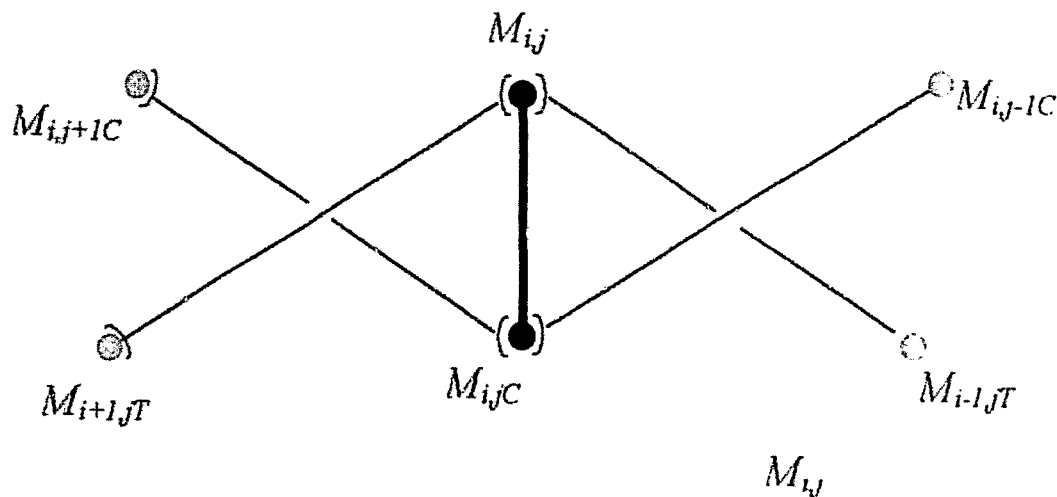


Figure II-3-6 : Le nœud élémentaire

De par le principe de maillage et le choix des modèles utilisés, les quatre forces de traction longitudinale, et les deux forces de flexion ont la même définition que celles apparaissant dans le modèle de fil.

Les forces d'encombrement nous permettent de traduire l'interaction des fils les uns par rapport aux autres. Elles garantissent un écartement minimal entre les nœuds, assurant la non pénétration des fils entre eux. Considérons les quatre nœuds élémentaires de la figure II-3-7 : A, B, C, D. Sous une sollicitation de cisaillement, les quatre nœuds se déplacent simultanément. Certains se rapprochent, d'autres s'éloignent les uns des autres et ce jusqu'à un contact latéral entre les fils.

Dans le modèle de tissu, les fils sont considérés comme étant incompressibles. Aussi, lorsque deux fils voisins viennent à rentrer en contact, il faut s'assurer que les sollicitations ne les conduisent pas à s'interpénétrer. Pour cela, le modèle intègre des forces d'encombrement qui s'opposent au mouvement. 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. Dans l'exemple de la Figure II-3-7, la saturation du mouvement due à la force d'encombrement apparaît dès que $\overline{AC}_y < 2r + d$ ou $\overline{BD}_y < 2r + d$.

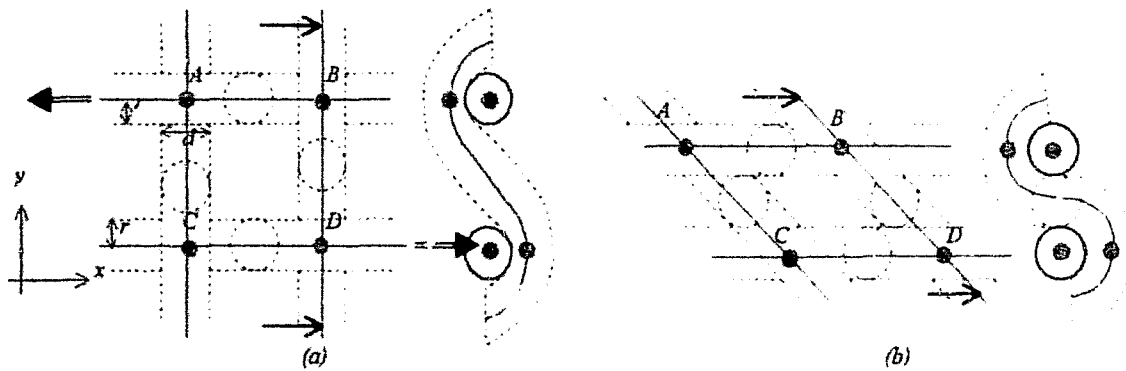


Figure II-3-7 : Saturation due à l'encombrement

Afin d'écrire le bilan des forces pour chaque nœud élémentaire, la Figure II-3-8 permet de définir les différents symboles utilisés.

Selon des notations analogues à celles utilisées pour le modèle de fil :

M_{IJ}	barycentre des points $M_{IJ,C}$ et $M_{IJ,T}$ (pondérés des masses $\mu_{IJ,C}$ et $\mu_{IJ,T}$),
$\mu_{IJ,C}$	masse de deux demi barres ramenée au nœud $M_{IJ,C}$,
$\mu_{IJ,T}$	masse de deux demi barres ramenée au nœud $M_{IJ,T}$,
μ_{IJ}	masse de deux nœuds $M_{IJ,C}$ et $M_{IJ,T}$ composant le nœud M_{IJ} ,
$\nu_{IJ,C}$	coefficient de frottement visqueux à l'air au nœud $M_{IJ,C}$,
$\nu_{IJ,T}$	coefficient de frottement visqueux à l'air au nœud $M_{IJ,T}$,
$\theta_{IJ,C}$	angle entre les deux barres $M_{I,J-1,C}M_{IJ,C}$ et $M_{I,J+1,C}M_{IJ,C}$,
$\theta_{IJ,T}$	angle entre les deux barres $M_{I-1,J,T}M_{IJ,T}$ et $M_{I+1,J,T}M_{IJ,T}$,
$\vec{u}_{IJ,C}$	vecteur déplacement du nœud $M_{IJ,C}$,
$\vec{u}_{IJ,T}$	vecteur déplacement du nœud $M_{IJ,T}$,
$\vec{u}_{IJ}$	vecteur déplacement du nœud M_{IJ} ,

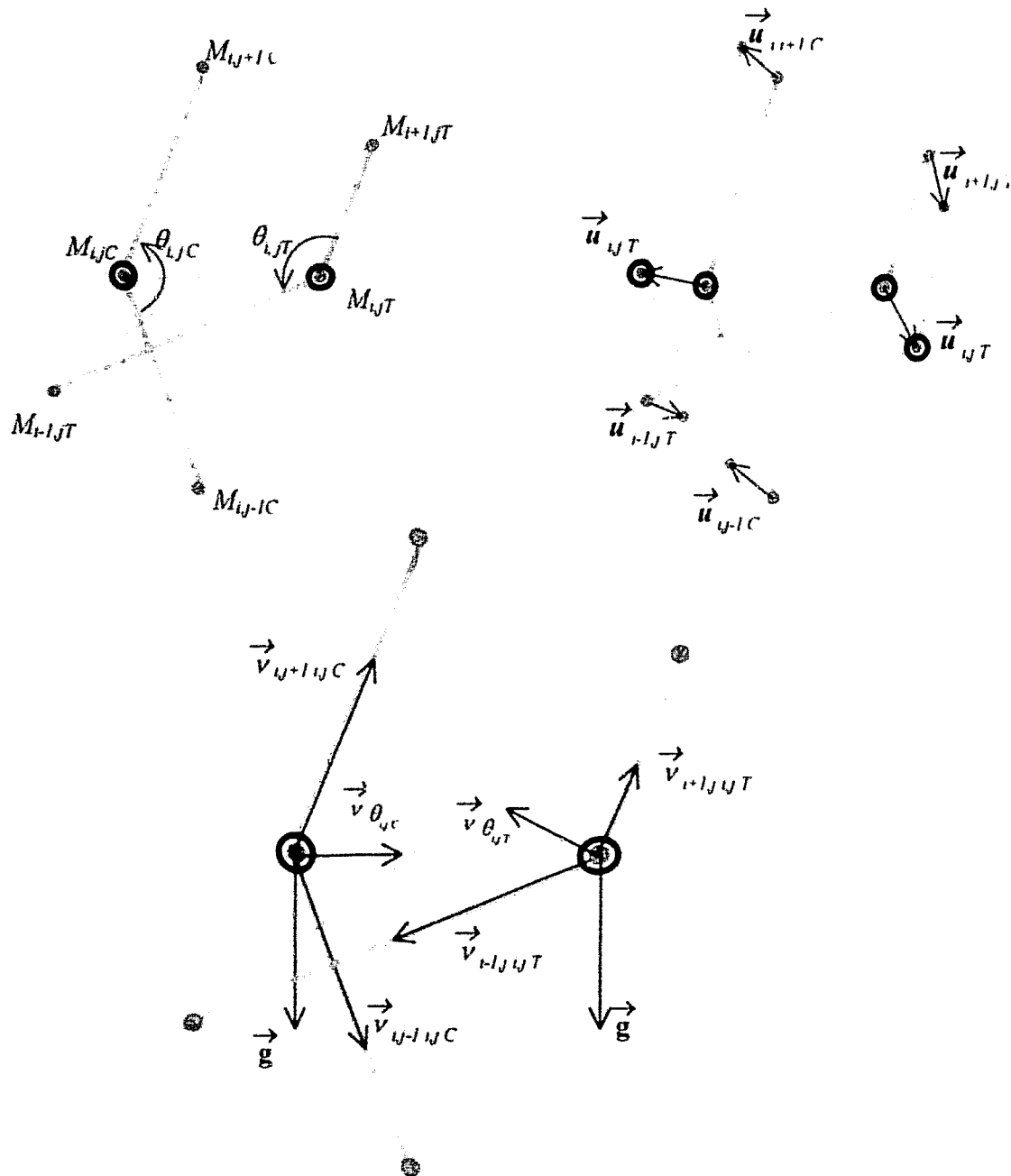


Figure II-3-8 : Élément considéré

$\vec{v}_{IJ-IJC}$ vecteur unitaire associé à la barre entre les nœuds $M_{IJ-I C}$ et $M_{IJ C}$.

$\vec{v}_{IJ+IJC}$ vecteur unitaire associé à la barre entre les nœuds $M_{IJ+I C}$ et $M_{IJ C}$.

$\vec{v}_{I-IJT}$ vecteur unitaire associé à la barre entre les nœuds $M_{I-I J T}$ et $M_{IJ T}$.

- $\vec{v}_{i+1,j,i,j,T}$ vecteur unitaire associé à la barre entre les nœuds $M_{i+1,j,T}$ et $M_{i,j,T}$,
 $\vec{v}_{\theta_{i,j,C}}$ vecteur porté par la bissectrice de l'angle $\theta_{i,j,C}$,
 $\vec{v}_{\theta_{i,j,T}}$ vecteur porté par la bissectrice de l'angle $\theta_{i,j,T}$,
 $\vec{g}$ pesanteur terrestre.

Comme pour le modèle de fil, le Principe Fondamentale de la Dynamique (PFD) est appliqué sur le nœud élémentaire (Figure II-3-8), et ce, afin d'en définir le déplacement $\vec{u}_{i,j}$:

$$\vec{R}_{i,j}^* = \mu_{i,j} \frac{d^2 \vec{u}_{i,j}}{dt^2} + \nu_{i,j} \frac{d \vec{u}_{i,j}}{dt} + \vec{H}(\vec{u}_{i,j}) \quad (4)$$

avec
$$\vec{R}_{i,j}^* = \vec{P}_{i,j,C} + \vec{P}_{i,j,T} + \vec{F}_{ext,i,j} + \vec{F}_{encombrement} \quad (5)$$

et
$$\vec{H}(\vec{u}_{i,j}) = \vec{F}_{tr,i+1,j,i,j} + \vec{F}_{tr,i,j,i+1,j} + \vec{F}_{tr,i,j,i,j-1} + \vec{F}_{tr,i,j,i,j+1} + \vec{F}_{fl,i,j,C} + \vec{F}_{fl,i,j,T} \quad (6)$$

Et de la même façon que pour le modèle fil, $\vec{H}(\vec{u}_{i,j})$ n'est pas nécessairement linéaire par rapport à $\vec{u}_{i,j}$. Alors, l'équation (4) est considéré comme non linéaire. Les équations (4), (5) et (6) sont les équations de mouvement du nœud élémentaire $M_{i,j}$. Les équations (5) et (6) prennent en compte les différentes forces déjà rencontrées dans le modèle de fil.

9. Méthodes d'intégration et d'optimisation

9.1. Intégration du système dynamique

L'équation (1) pour le nœud fil et l'équation (4) pour l'élément tissu sont des équations différentielles du deuxième ordre non linéaire non homogène. Afin de simplifier l'écriture, ces deux équations, sont réécrites, pour un élément donné à l'instant t , en utilisant des notations simplifiées :

$$\vec{R}^*(t) = \mu \frac{d^2 \vec{u}(t)}{dt^2} + \nu \frac{d \vec{u}(t)}{dt} + \vec{H}(\vec{u}(t)) \quad (7)$$

L'intégration de cette équation différentielle nécessite un échantillonnage temporel de période te (soit $t=n te$). Le choix de te est guidé par le respect des contraintes de SHANNON. Ce choix

est délicat. Toutefois, en première approximation, on peut considérer que te doit être au moins deux fois plus petit que la plus petite constante de temps du système. Dans notre cas, il est possible d'estimer expérimentalement cette constante de temps en étudiant la réponse du fil à une sollicitation mécanique en forme de créneau [FERR 96]. Le chapitre 3-3 détaille ce dispositif. Ces conditions conduisent à des valeurs de te de l'ordre de 10^{-7} s.

Finalement, te se déduit de la vitesse de propagation d'une onde mécanique dans le fil, c'est-à-dire du temps que met cette onde pour « passer » d'un nœud à son voisin.

La période te étant extrêmement faible, le choix de la méthode d'intégration s'est portée sur la méthode des différences finies, méthode qui garantit un bon compromis entre temps de calcul et précision.

L'équation (7) est intégrée par itérations successives. Pour cela, dans un premier temps, sont effectuées les transformations suivantes :

$$R(t, u(t)) = R^*(t) - H(u(t)) \quad (8)$$

$$R(t, u(t)) = \mu \frac{d^2 u}{dt^2}(t) + v \frac{du}{dt}(t) \quad (9)$$

Dans un deuxième temps, on discrétise le temps en période te , ce qui conduit au système suivant :

$$\begin{cases} R_n = R(n te, u(n te)) \\ \frac{du}{dt}(n te) = V(n te) \\ \mu \frac{dV}{dt}(n te) + v V(n te) = R_n \end{cases} \quad (10)$$

Finalement, en appliquant la méthode des Différences Finies, on obtient :

$$\frac{dV}{dt}(nte) = \frac{V((n+1)te) - V((n-1)te)}{2 te} \quad (11)$$

$$\text{et} \quad \frac{du}{dt}(nte) = \frac{u((n+1)te) - u((n-1)te)}{2 te} \quad (12)$$

Le système (10) s'écrit alors :

$$\begin{cases} R_n = R(n te, u(n te)) \\ V((n+1)te) = \frac{2 te}{\mu} (R_n - v V(n te)) + V((n-1)te) \\ u((n+1)te) = 2 te V(n te) + u((n-1)te) \end{cases} \quad (13)$$

9.2. Propagation et optimisation des calculs

Le développement des deux modèles et l'implémentation de la solution d'intégration ont fait apparaître un problème de propagation des sollicitations externes à l'intérieur du tissu. Cette difficulté est résolue à l'aide de la méthode des rangs.

Afin d'accélérer les calculs, nous considérons l'échelle du tissu en comparaison de celle du phénomène physique. Ceci nous amène à utiliser le multi-échantillonnage et une méthode de prédiction.

9.2.1. Propager l'onde mécanique : méthode des rangs

L'analyse détaillée des phénomènes internes à la structure tissu, obtenue à partir des premiers essais de simulation, permet de constater que tout déplacement d'un nœud $M_{i,j}$, conduit nécessairement aux déplacements des nœuds voisins ($M_{i-1,j}$, $M_{i+1,j}$, $M_{i,j-1}$, $M_{i,j+1}$). À l'inverse, un nœud à déplacement nul n'entraîne pas les déplacements de ses voisins. Un nœud proche d'une sollicitation extérieure est donc plus susceptible de bouger qu'un nœud éloigné.

À partir de cette constatation, il est possible d'optimiser le balayage de la structure tissu par l'algorithme. En effet, on peut classer les nœuds élémentaires les uns par rapport aux autres. Pour cela, un rang leur est attribué. Le 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 ($\sum |coord|$). 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 (encasté). En prenant l'exemple de la Figure II-4-1, dans laquelle la structure est soumise à une traction, les nœuds de $M_{1,1}$ à $M_{1,6}$ sont encastés (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 (éloignés des sollicitations). Ainsi, les nœuds $M_{5,1}$, $M_{5,2}$, $M_{5,3}$, $M_{6,4}$ de rang 2 (Figure II-4-1) sont à calculer avant les nœuds de rang 3 : nœuds $M_{4,1}$, $M_{4,2}$, $M_{4,3}$, $M_{5,4}$, $M_{6,5}$.

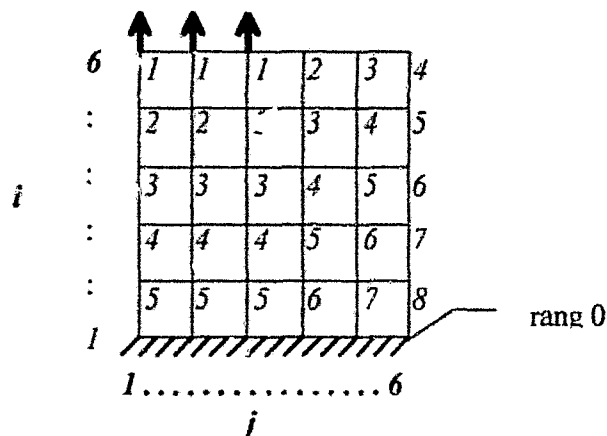


Figure II-4-1 : Le rang des nœuds

Ce principe évite les calculs inutiles d'un balayage aléatoire de l'ensemble de la structure, coûteux en temps de calcul. De plus, cette solution garantit une bonne propagation des phénomènes dans le tissu.

9.2.2. Améliorer le temps de calcul : méthode du multi-échantillonnage

La mise en place de la méthode de calcul par rang, si elle assure la propagation des sollicitations extérieures à l'intérieur du tissu, n'améliore que peu le problème posé par le temps de calcul.

Pour pallier cette difficulté, on observe que le changement d'échelle, c'est-à-dire le passage du fil au tissu, fait apparaître deux niveaux d'observation différents. Le premier concerne le fil et permet d'observer la propagation de l'onde mécanique. Il est en relation avec une observation microscopique conduisant à la période te . Le second concerne le tissu et permet la visualisation du phénomène étudié. Il est en relation avec une observation macroscopique conduisant à une période $Te > te$. Pour des commodités (évidentes) de calcul, Te est choisie telle que $Te = N te$, N étant un entier. Aussi, en fonction de l'utilisation du modèle, on peut être amené à utiliser l'une ou l'autre ou les deux de ces périodes. Les infographistes qui s'attachent principalement à une observation macroscopique utilisent Te , ce qui les contraint à de nombreuses hypothèses simplificatrices (voire réductrices) [PROV 97]. Ces hypothèses conduisent à des solutions acceptables du point de vue de la représentation infographique, mais approximatives du point de vue de l'analyse mécanique.

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 . (Figure II-4-2) On parle alors de multi-échantillonnage.

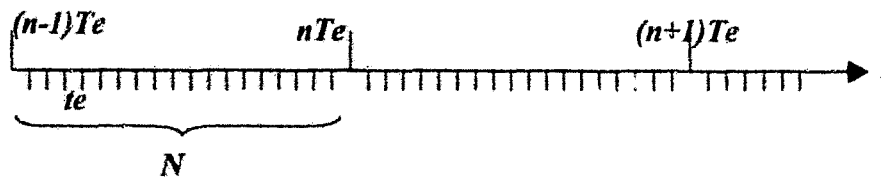


Figure II-4-2 : Le multi-échantillonnage

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 , nous déterminons l'équilibre dynamique de tous les nœuds élémentaires.

Par une analyse des résultats, il est apparu que la structure converge vers sa position d'équilibre dynamique en un nombre N' de période te tel que $N' \ll N$. 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-4-3.

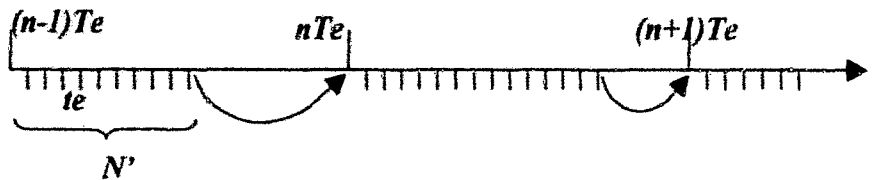


Figure II-4-3 : Le multi-échantillonnage modifié

Par cette technique, on économise $(N-N')$ période te à chaque étape de calcul.

9.2.3. Améliorer le temps de calcul : méthode prédictive

Les approximations de calcul et la propagation des erreurs font apparaître un phénomène assimilable à un problème de super-élasticité. 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. C'est le calcul réitéré du mouvement de chaque nœud qui corrige, si besoin est, cette approximation.

Soit un fil de section cylindrique S dont le rayon est faible par rapport à la longueur (Figure II-4-4).

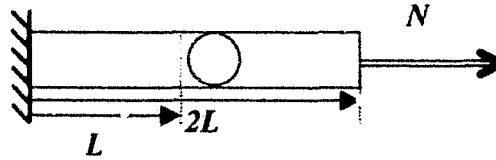


Figure II-4-4 : fil avant déformation

Sous la contrainte N , le fil s'allonge de $2X$. (Figure II-4-5).

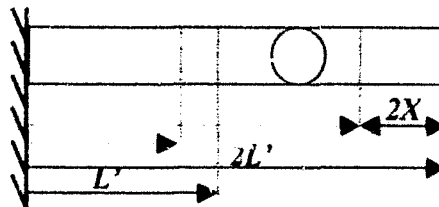


Figure II-4-5 : fil après déformation

Soit :

$u(x)$: déplacement du point M d'abscisse x ,

$\varepsilon(x)$: déformation du point M d'abscisse x ,

on a :

$$\varepsilon(x) = \frac{du}{dx} = \frac{X}{L}$$

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 ($x=L$),

$$u(L)=X$$

Appliqué au modèle de fil, ce résultat permet de dire que si le fil de la figure II-4-6 s'allonge de $4X$ sous une contrainte de traction, alors :

- le point A_1 se déplace de X ,
- le point A_2 se déplace de $2X$,
- le point A_3 se déplace de $3X$,
- le point A_4 se déplace de $4X$.

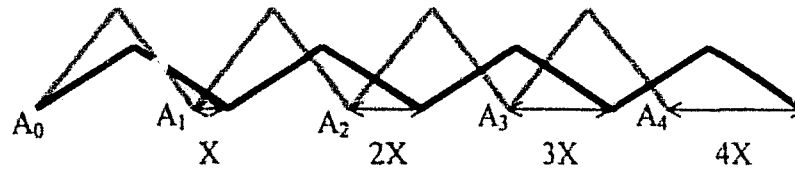


Figure II-4-6 prédiction des déplacements sur un fil

Ce résultat est très simplement transposable sur le modèle de tissu, Ainsi, le tissu de la Figure 15 étant sous une contrainte de traction, les nœuds $N_{5,1}$ à $N_{5,5}$ se déplacent de X alors il est possible de faire la prédiction suivante (Figure II-4-7) :

- les nœuds $N_{1,1}$ à $N_{1,5}$ 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 $N_{3,1}$ à $N_{3,5}$ se déplacent de $\frac{3}{5}X$,
- les nœuds $N_{4,1}$ à $N_{4,5}$ se déplacent de $\frac{4}{5}X$.

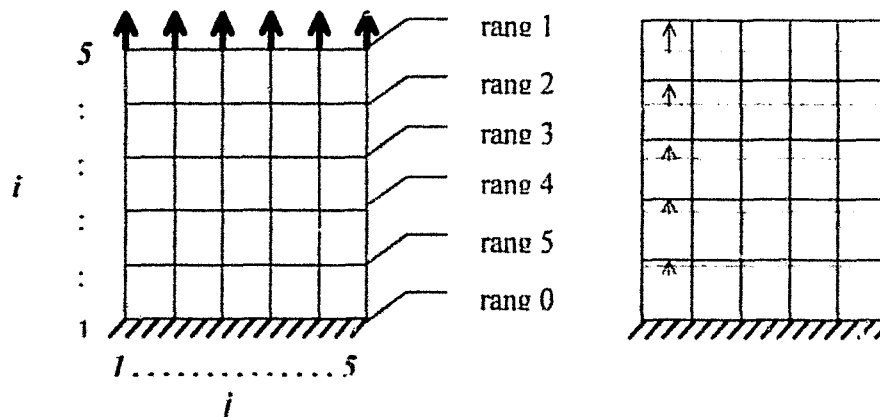


Figure II-4-7 : prédiction des déplacements sur un tissu

Comme le montre la figure II-4-8, 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 .

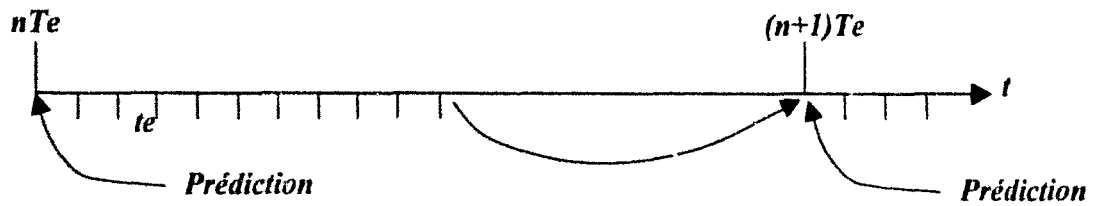


Figure II-4-8 : Application de la prédiction

La Figure II-4-9 permet de comparer la convergence d'un nœud vers trois positions d'équilibre successives dans les trois cas suivants. Le cas 1 est sans prédiction, le cas 2 est avec prédiction mais sans tenir compte de la correction. Le cas 3 est avec prédiction en tenant compte de la correction.

Sur la Figure II-4-9, 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. Quelque 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.

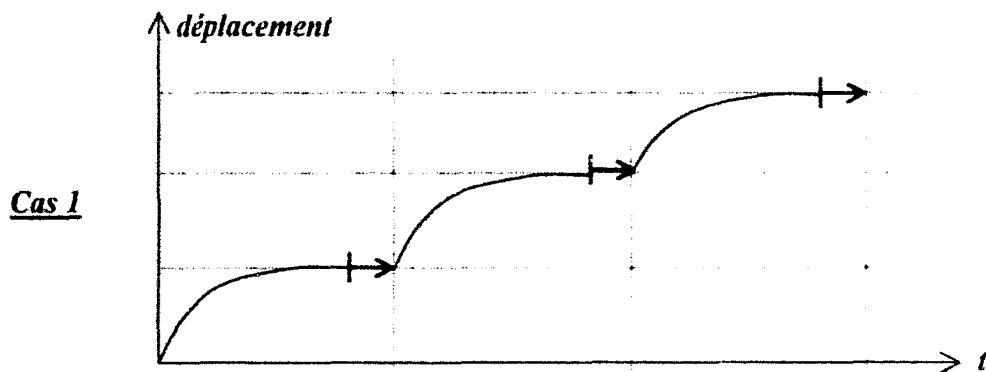


Figure II-4-9 (a) : Pas de prédiction

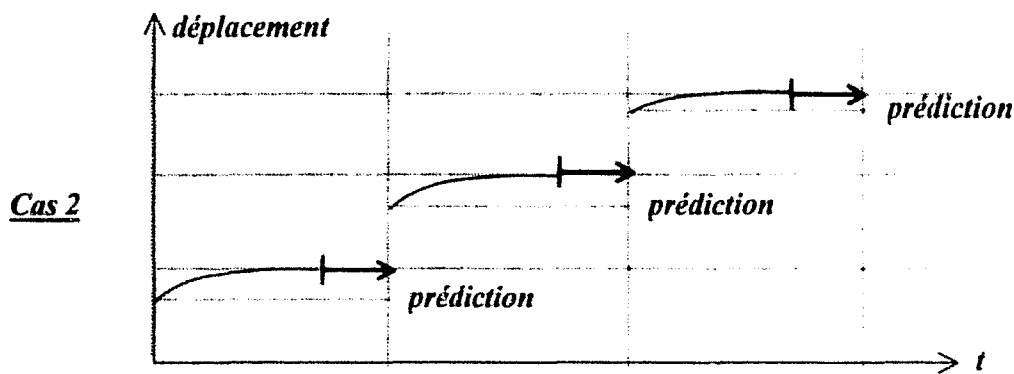


Figure II-4-9 (b) : Prédictions

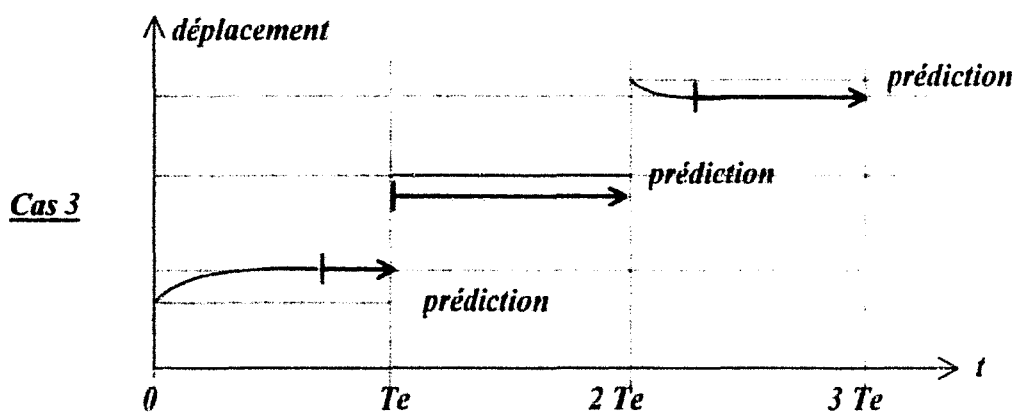


Figure II-4-9 (c) : Prédictions corrigées

De plus, les temps de simulation dans le cas 1 ont été divisé par environ 100 dans le cas 3.

9.3. Mise en œuvre

Aucun logiciel de mécanique ou de mathématique ne permet de simuler le modèle de fil et/ou le modèle de tissu. Aussi, l'ensemble des développements présentés dans ce document a été réalisé en langage C/C++ compatible ANSI. Le choix du langage C/C++ se justifie par le fait que la programmation orientée objet permet de réaliser un logiciel parfaitement évolutif. De plus, présent sur diverses plates-formes, il garantit la portabilité de nos travaux. Ainsi, le programme est réellement modulaire et se décompose en diverses parties comme :

- initialisation des paramètres du fil,
- initialisation des paramètres du tissu,
- comportement en traction,
- comportement en flexion,
- calcul des déformations du fil.

- calcul des déformations du tissu,
- visualisation des résultats,
- ...

10. Conclusion

Ce chapitre a présenté les solutions adoptées pour répondre au mieux à la problématique fixée. Compte tenu d'un objectif de prédiction d'un comportement mécanique d'un TuT à partir de la seule connaissance de sa géométrie et des propriétés des fils le constituant, un modèle de fil et un modèle de tissu ont été définis. Aussi, deux modèles complémentaires ont été développés. Le passage du fil au tissu se fait par la définition du comportement du point de croisure, choisi comme élément de base du maillage de la structure du tissu. Ainsi est réalisé le changement d'échelle. Ceci permet aux modèles de traduire au mieux la réalité physique : phénomène étudié à partir du phénomène physique.

De plus, le changement d'échelle a permis de mettre en évidence deux échelles temporelles d'observation, l'une liée au fil (t_e), l'autre liée à la représentation du tissu (T_e). Cette seconde échelle de temps permet d'enrichir le modèle de tissu par des approximations admissibles. Rappelons que la discrétisation temporelle conduit à faire l'hypothèse que les contraintes extérieures sont constantes par morceau sur chaque période T_e et que la structure tissu se déforme de façon homogène. Ces deux hypothèses ont conduit à accélérer fortement les calculs.

Cependant, dans ce chapitre, les phénomènes physiques apparaissent sous la forme de pure spéculations théoriques. Le chapitre suivant présente les méthodes adoptées pour faire de nos modèles théoriques, des modèles traduisant et intégrant l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu. Ainsi, après un chapitre décrivant la modélisation retenue, le chapitre suivant traite l'identification des paramètres du modèle de tissu.

Chapitre III

Identification des paramètres d'un fil

Identification des paramètres d'un fil	57
1. Introduction	57
2. Identification du comportement en traction	58
2.1. Objectif	58
2.2. Dispositif expérimental	58
2.3. Modélisation du comportement en traction	60
2.3.1. Modèle élastique non linéaire : modèle de comportement	60
2.3.2. Modèle rhéologique viscoélastique	61
2.3.3. Modèle viscoélastique non linéaire avec relaxation	63
2.3.3.1. Influence de la vitesse	63
2.3.3.2. Le phénomène d'hystérésis	65
2.3.3.3. Modèle de comportement en traction adopté	66
3. Identification du comportement en flexion	67
3.1. Objectif	67
3.2. Dispositif expérimental	68
3.2.1. Principe général	68
3.2.2. Dispositif de lâché de fil	68
3.2.3. Le système de prise d'images	69
3.2.4. Traitement des images	70
3.3. Identification du paramètre C_f	75
3.3.1. Démarche méthodologique	75
3.3.2. Principe général	75
3.3.3. Méthodes utilisées	76
3.3.4. Intérêts et limites de la démarche retenue	78
3.3.5. Réglages préliminaires à l'identification	78
3.3.5.1. Détermination du retard pour la synchronisation	78
3.3.5.2. Réglage des paramètres de l'algorithme	79
4. Analyse du comportement en propagation	79
4.1. Objectif	79
4.2. Dispositif expérimental	79
4.3. Choix des conditions opératoires	81
4.3.1. Influence de la longueur de l'éprouvette	81
4.3.2. Influence de la longueur de l'impulsion	82
4.3.3. Influence de la masse de prétention m du fil	82
4.3.4. Choix réalisé	83
4.4. Choix de la période d'échantillonnage τ_e	83

5. Conclusion **83**

Identification des paramètres d'un fil

11. Introduction

Le chapitre précédent a permis de détailler le modèle de fil et le modèle de tissu. Les comportements mécaniques du fil et leurs implications dans le processus de calcul y ont été exposés, en soulignant l'intérêt de définir des modèles paramétriques identifiables, c'est-à-dire des modèles dont il est possible de déterminer tous les paramètres par de simples essais sur le matériau réel.

L'objectif du présent chapitre est d'expliquer les modes opératoires des solutions retenues pour identifier les paramètres du modèle de fil. Il est à remarquer que ces paramètres ne sont pas nécessairement liés à une grandeur physique. De plus, les solutions proposées sont établies pour tout type de fil, qu'il soit fil fibreux, fil monofilamentaire ou fil multifilamentaire, fil tordu, ou non.

Pour cela, il est apparu nécessaire de classer les paramètres du modèle en fonction de leur implication dynamique. Cela conduit à diviser l'espace paramétrique en différents sous espaces, et ce, selon l'affinité des paramètres lors de l'identification et selon le principe de superposition. Cette stratégie a pour but d'éviter toute compensation paramétrique et donc de limiter d'éventuelles erreurs. Dans une classe donnée, le modèle global du fil se trouve alors réduit à un sous modèle dans lequel certaines variables sont annihilées par le fait qu'elle n'interviennent pas dans le comportement étudié. Ainsi, les essais retenus, correspondant à chaque sous espace paramétrique, mettent en exergue un comportement précis et sont rattachés à des conditions d'essais bien précises. Ceci est assuré par des études de sensibilité paramétriques. [LEGR 00/3]

Ce chapitre est structuré en fonction du comportement mis à l'étude.

Le comportement en traction est obtenu par des tests sur dynamomètre classique. L'utilisation combinée des techniques de vision artificielle et d'une "Méthode du Modèle" [RICH 71] en programmation non linéaire permet d'appréhender le comportement en flexion du fil. Pour le comportement en propagation, le dispositif adopté traduit la réponse du fil à une impulsion mécanique.

12. Identification du comportement en traction

12.1. Objectif

Les forces de traction $\vec{F}_{tr, k-1, k}$ du modèle de fil font nécessairement intervenir le comportement en traction du fil. Ainsi, la traction du segment $B_{k,k-1}$ (Figure III-2-1), induit un déplacement $\vec{u}_k$. Ce déplacement est considéré comme infiniment petit. Le déplacement du nœud M_k entraîne l'allongement $\xi_{k-1, k}$ de la barre $B_{k,k-1}$ devenant alors $B'_{k,k-1}$. La réaction $\vec{F}_{tr, k-1, k}$ portée par $\vec{v}_{k-1, k}$ s'écrit :

$$\vec{F}_{tr, k-1, k} = f_{tr}(\xi_{k-1, k}) \vec{v}_{k-1, k}$$

où $\vec{v}_{k-1, k}$ est le vecteur unitaire associé à la barre entre les nœuds M_{k-1} et M_k .

$\xi_{k-1, k}$ est l'allongement de la barre $B_{k-1, k}$ induit par $\vec{u}_k$,

f_{tr} est le modèle de représentation du comportement en traction du fil.

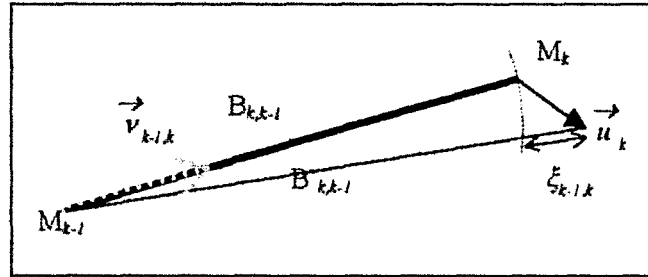


Figure III-2-1: Comportement en traction d'une barre

L'objectif de ce paragraphe 2 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.

Cette section ne prétend pas solutionner le très complexe problème de la modélisation des polymères, le fil pouvant être considéré comme tel, mais se propose de présenter les modèles simples adoptés en adéquation avec l'objectif de ces travaux.

12.2. Dispositif expérimental

Le dispositif utilisé pour identifier le comportement en traction du tissu est un dynamomètre classique Adamel Lhomargy (Figure III-2-2).

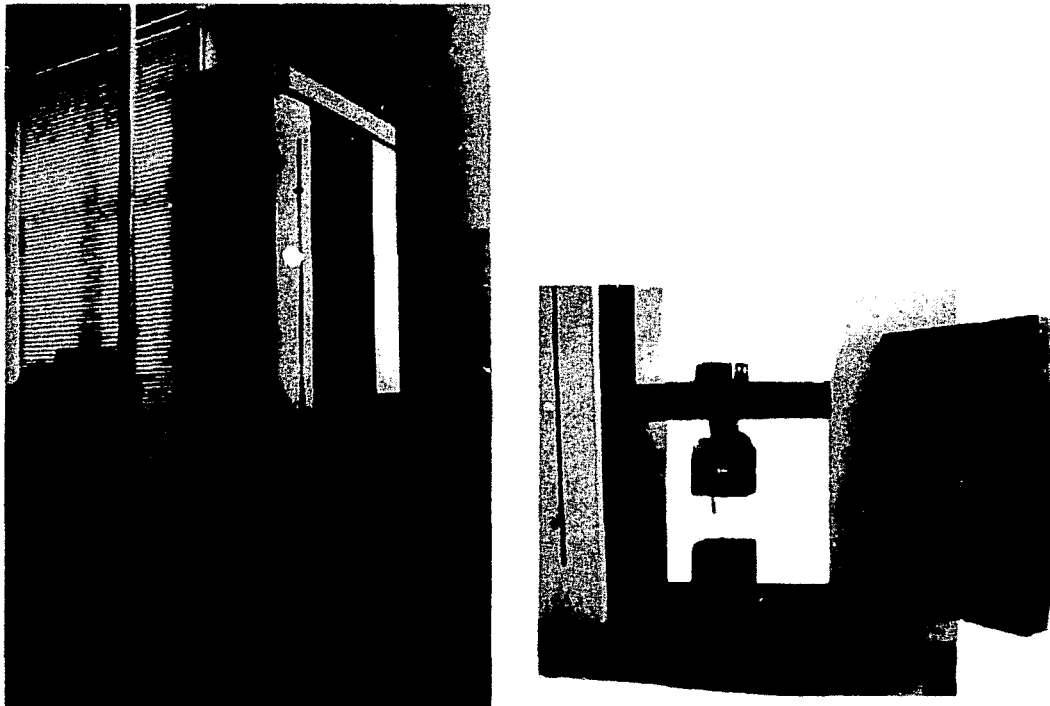


Figure III-2-2: Dynamomètre conventionnel

Les essais ont été effectués en conditions normalisées, c'est-à-dire, à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et avec une hygrométrie relative de $65\%\text{HR} \pm 2\%$. Un tel dispositif, selon la Norme ISO 2062, (équivalent à la NF GO7-003) permet d'obtenir les mesures, issues de la traction d'un fil jusqu'à sa rupture, représentées par la courbe de la Figure III-2-3. Cette courbe est en fait la moyenne des essais de traction réalisés pour un fil.

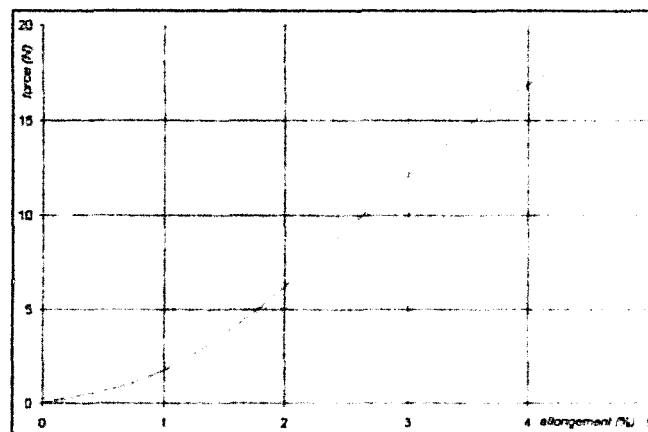


Figure III-2-3: Courbe de traction du fil

12.3. Modélisation du comportement en traction

Le comportement en traction du fil peut être assimilé à différents modèles de représentation conduisant à des domaines de validités différents. Lors d'essais simples sur le tissu (traction, poinçonnement, ...), le fil à l'intérieur du tissu subit une sollicitation en traction variable en intensité et en vitesse. Aussi, le modèle adopté se doit-il de prendre en compte les effets de la vitesse, de la relaxation, de l'hystérésis. La démarche qui a conduit à adopter le modèle utilisé pour ce travail est exposée ici.

Une première approximation, établie à partir de l'observation de la courbe de traction (Figure III-2-3), a conduit à un modèle élastique non linéaire. Dans une seconde approximation, afin de tenir compte des effets de la vitesse, à l'aide de la théorie de la viscoélasticité, ce modèle a été orienté vers le modèle de Burgers. Enfin, le modèle adopté décompose le comportement du fil en trois : un comportement viscoélastique, un comportement en vitesse et un comportement en hystérésis. Ainsi décomposé, il nous semble que le modèle choisi rend au mieux compte du comportement du fil en traction sous contraintes et allongements variables au cours du temps à l'intérieur du tissu.

12.3.1. Modèle élastique non linéaire : modèle de comportement

La première idée qui vient pour modéliser la courbe de la Figure III-2-3 est de l'assimiler à une droite, considérant le fil comme un ressort linéairement élastique. Soit :

$$f_{tr}(\xi) = a \xi \quad (1)$$

avec ξ : allongement (en %) du fil.

L'erreur commise selon cette hypothèse peut être obtenue par la différence entre la courbe expérimentale et la droite de l'équation (1). Cette erreur non négligeable est représentée en Figure III-2-6.

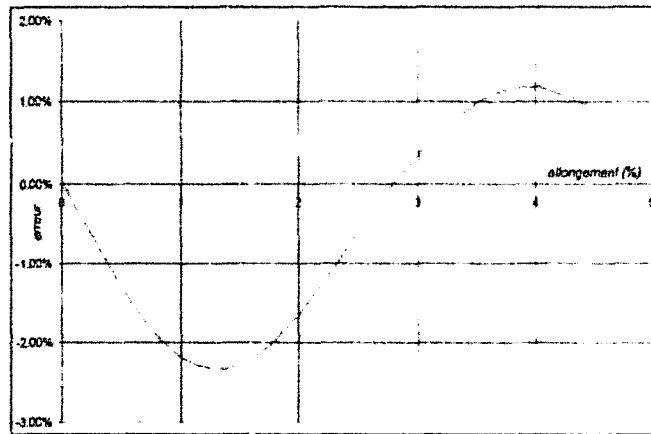


Figure III-2-6: Erreur commise en élasticité linéaire pure

L'allure de cette erreur peut être assimilée à une sinusoïde amortie. Cela amène à compléter le modèle qui s'écrit alors :

$$f_{lr}(\xi) = a \xi + b + c \sin(d(\xi - e)) e^{f(\xi - e)} \quad (2)$$

Ces travaux ont fait l'objet de la première étape de modélisation [LEGR 00/2]. La Figure III-2-7 donne la nouvelle erreur commise en %.

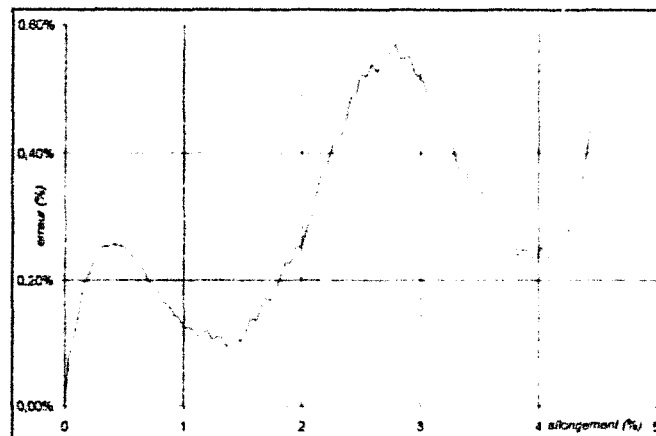


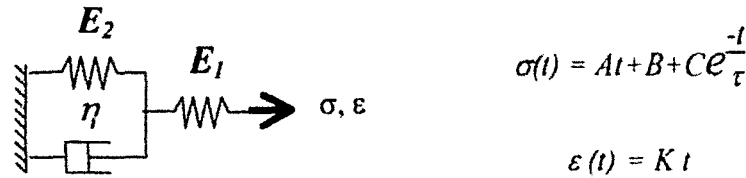
Figure III-2-7: Erreur commise (en %)

Le modèle défini par l'équation (2), s'il rend compte à 0,6% d'erreur près de la courbe de la Figure III-2-3, ne permet pas de tenir compte de l'ensemble du comportement du fil sous sollicitation de traction dans le tissu. Il ne tient pas compte, par exemple, de l'influence de la vitesse. Pour cela, il est nécessaire de définir un nouveau modèle et donc de nouveaux tests.

12.3.2. Modèle rhéologique viscoélastique

Dans cette section, le comportement en traction d'un fil est modélisé à l'aide de modèles rhéologiques. [FRAN] [TI] (cf. Annexe)

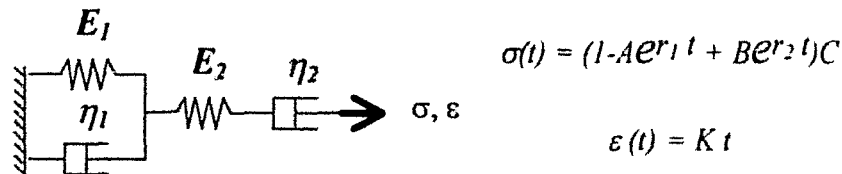
Dans un premier temps, il a été tenté d'assimiler ce comportement à celui décrit par le modèle généralisé de Maxwell. [KACE 00]



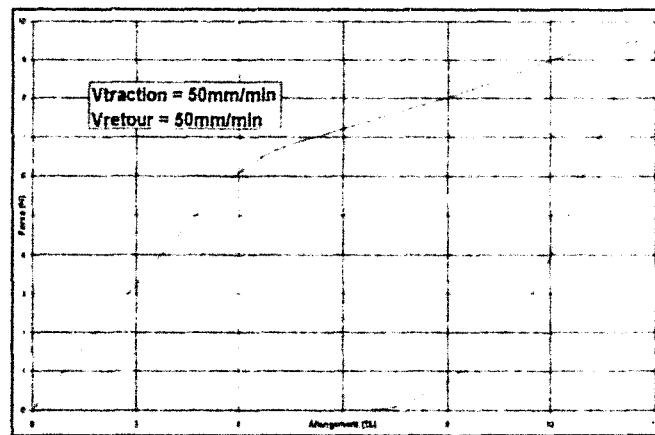
$$A = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} K \quad B = \eta K \left(\frac{E_1}{E_1 + E_2} \right)^2 \quad C = -B \quad \frac{1}{\tau} = \frac{E_1 + E_2}{\eta}$$

Une étude critique des résultats obtenus avec le modèle généralisé de Maxwell appliqué à la rhéologie en traction simple de fil, montre que celui-ci n'est pas suffisamment complet. Il limite, en effet, la modélisation à la traction jusqu'à rupture à des fils linéairement élastiques. Dans ce cas, la courbe de traction est très proche d'une droite.

C'est pourquoi, l'évolution vers le modèle de Burgers est nécessaire. Ce modèle représente le précédent modèle en série avec une viscosité η_2 . [KACE 00]



Il permet de modéliser de façon correcte l'ensemble des fils testés soumis à la traction jusqu'à rupture. De plus, il a été montré que le modèle traduisait très bien le comportement du fil en relaxation. En effet, pour $\varepsilon = \varepsilon_0$, on obtient $\sigma(t)$ de la forme :



$$\sigma(t) = A' e^{r'_1 t} + B' e^{r'_2 t} \quad \text{pour} \quad \varepsilon = \varepsilon_0$$

Figure III-2-8: Un cycle faisant apparaître une hystérésis

Le modèle de Burgers est donc acceptable dans le cas de la traction pour représenter le comportement du fil. Il tient compte de l'influence de la vitesse. Cependant, il ne permet pas de modéliser l'hystérésis du fil (Figure III-2-8) lors d'une sollicitation cyclique. De plus, la viscosité η_2 interdit, pour toutes sollicitations, de revenir à l'origine, même après un temps infini. Aucune combinaison simple de ressorts et de viscosités n'a permis de résoudre ces problèmes.

Aussi, le modèle de comportement en traction proposé et correspondant aux exigences de cette étude est un modèle viscoélastique non linéaire avec relaxation. Bien que le modèle de Burgers ne soit pas retenu, les résultats déterminés par l'étude en viscoélastique sur la modélisation de la relaxation sont conservés.

12.3.3. Modèle viscoélastique non linéaire avec relaxation

Cette section détaille la dernière approche proposée concernant la modélisation du comportement en traction du fil sous sollicitation discontinue. Cette approche est un modèle de comportement, établi empiriquement après une analyse de la forme de la courbe de traction.

12.3.3.1. Influence de la vitesse

Après une analyse fine des courbes de traction, l'hypothèse est faite que, la relaxation et l'influence de la vitesse sur le comportement en traction sont liées. Le modèle adopté fait apparaître deux comportements : un comportement élastique et un comportement visqueux dépendant du temps. Ce modèle peut s'écrire :

$$f_{tr}(\xi, \dot{\xi}, t) = K(\xi) + [V(\dot{\xi}) + R(t)]$$

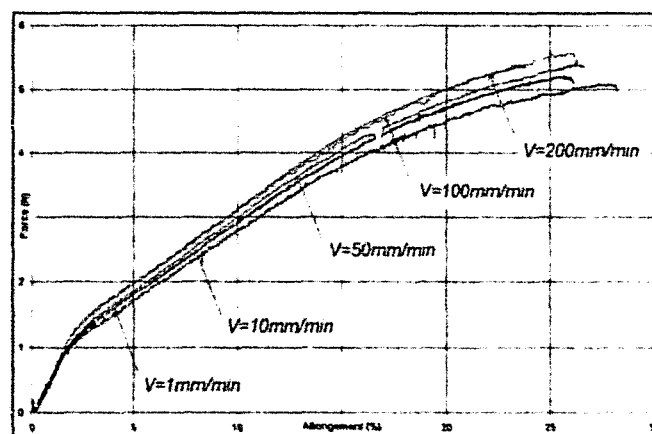


Figure III-2-9: Différentes vitesses de traction.

La Figure III-2-10 correspond à différents tests de relaxation pendant 500s.

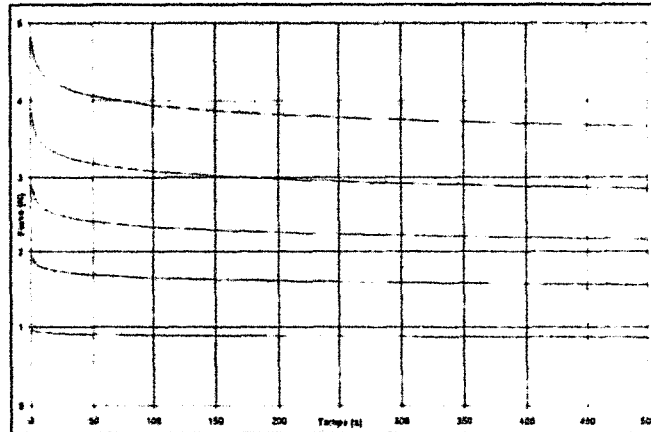


Figure III-2-10: Tests de relaxation d'un fil.

En soustrayant, à la courbe de traction jusqu'à rupture, les composantes dépendant du temps, le comportement hors relaxation peut être obtenu : il est alors purement élastique. (Figure III-2-11)

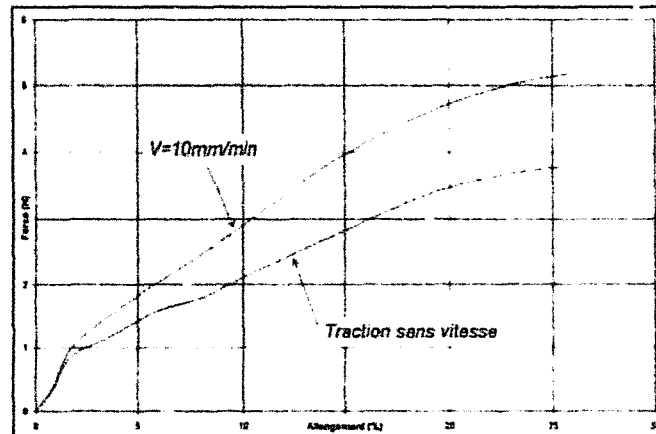


Figure III-2-11: Avec et sans la relaxation.

Ainsi, la courbe notée (*Traction sans Vitesse*) de la Figure III-2-11 correspond à la partie $[V(\xi) + R(t)]$ du modèle. En tenant compte des résultats de la section précédente, il a été adopté :

$$K(\xi) = a \xi + b + c \sin (d (\xi - e)) e^{f(\xi - e)}$$

$$[V(\xi) + R(t)] = A e^{Bt} + C e^{Dt}$$

La fonction $K(\xi)$ traduit l'aspect de la courbe lorsque la vitesse de traction tend vers zéro. Le second terme intègre le phénomène de relaxation et permet de faire apparaître l'influence de la vitesse. (Figure III-2-12)

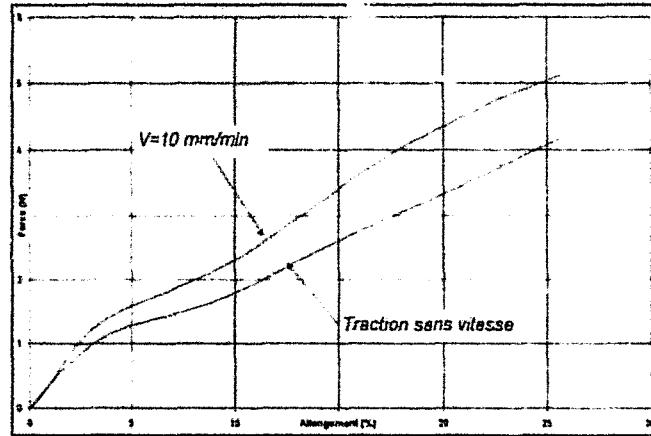
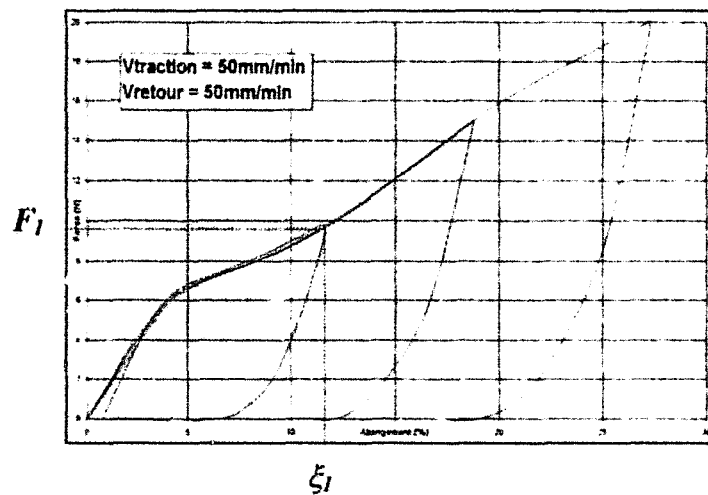


Figure III-2-12: Modèle prenant en compte l'influence de la vitesse.

12.3.3.2. Le phénomène d'hystérésis

Cette section est consacrée à la modélisation du comportement d'un fil sous sollicitation de traction en tenant compte de l'effet d'hystérésis. La Figure III-2-13 montre ce phénomène à



différents seuils de sollicitations (ξ_l, F_l) .

Figure III-2-13: Comportement en hystérésis d'un fil.

Il est indispensable que la fonction d'interpolation de la courbe d'hystérésis dépende du point (ξ_l, F_l) atteint sur la courbe de traction simple. Aussi, la courbe d'hystérésis est elle identifiée à la fonction suivante :

$$F(\xi) = e^{\alpha(\xi-\beta)} - 1$$

avec $\alpha = \gamma \ln(\xi_l) + 1$ et $\beta = \xi_l - \frac{1}{\alpha} \ln(F_l - 1)$

La figure III-2-14 donne quelques résultats de la modélisation du comportement du processus d'hystérésis. La superposition des courbes justifie l'approche que nous avons adoptée.

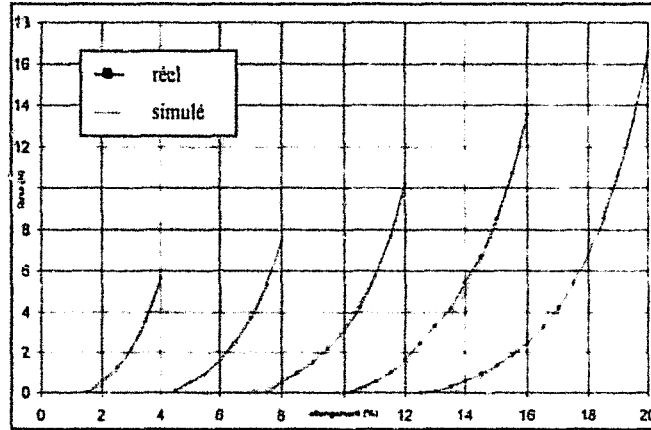


Figure III-2-14: Modèle en hystérésis adopté.

12.3.3.3. Modèle de comportement en traction adopté

A partir des différentes expériences et hypothèses présentées précédemment, il est possible de conclure cette section en définissant complètement le modèle pour l'étude. Le modèle global de comportement en traction retenu est représenté par le système d'équations suivant :

$$f_r(\xi, \dot{\xi}, t) = \begin{cases} a\xi + b + c \sin(d(\xi - e)) e^{f(\xi - e)} + A e^{Bt} + C e^{Dt} & \text{si } \dot{\xi} \geq 0 \\ F(\xi) = e^{\alpha(\xi - \beta)} - 1 & \text{si } \dot{\xi} < 0 \\ \text{avec } \alpha = \gamma \ln(\xi_t) + 1 \end{cases}$$

Ainsi, pour identifier complètement les paramètres d'un tel modèle, il est nécessaire de réaliser :

- un test jusqu'à rupture pour obtenir les paramètres (a, b, c, d, e, f)
- un test de relaxation pour obtenir les paramètres (A, B, C, D)
- un test d'hystérésis pour obtenir les paramètres (α, β, γ)

L'intérêt de cette stratégie est qu'elle garantit la séparation des paramètres par les différents essais, et donc évite toute compensation paramétrique.

L'identification des paramètres ainsi définis peut se faire à l'aide d'un logiciel spécialisé comme *CURVE EXPERT* ou avec un logiciel de calcul scientifique comme *MATLAB*.

13. Identification du comportement en flexion

13.1. Objectif

Comme il a été expliqué dans le chapitre 2, le comportement en flexion du fil induit, pour tout angle θ_k au nœud M_k , (Figure III-3-1), une force de réaction $\vec{F}_{fl,k}$ portée par le vecteur unitaire $\vec{v}_{\theta_k}$, telle que :

$$\vec{F}_{fl,k} = g_{fl,k}(\theta_k) \vec{v}_{\theta_k}$$

avec g_{fl} : modèle de représentation du comportement en flexion du fil. (cf. Chapitre 2)

$$\vec{v}_{\theta_k} = \frac{\vec{v}_{k,k-1} + \vec{v}_{k,k+1}}{\|\vec{v}_{k,k-1} + \vec{v}_{k,k+1}\|}$$

et si $\vec{v}_{k,k-1} + \vec{v}_{k,k+1} = \vec{0}$, $\vec{v}_{\theta_k}$ se déduit de $\vec{v}_{k,k+1}$ par un rotation de $+\frac{\pi}{2}$.

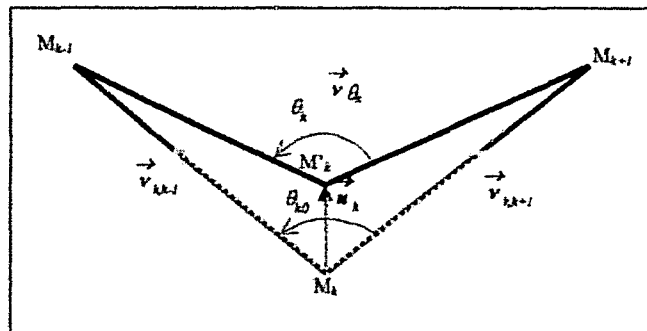


Figure III-3-1 : Comportement en flexion

Ce modèle de représentation considère que le fil a un comportement en flexion de type élastique linéaire pure. Dans ce cas, la fonction g_{fl} s'écrit :

$$g_{fl,k}(\theta_k) = C_f(\theta_k - \theta_{k0}) \quad (2)$$

avec C_f : coefficient d'élasticité en flexion du fil.

L'objectif de cette section est de déterminer le paramètre C_f . Pour cela un dispositif expérimental combinant la vision artificielle et l'identification par la méthode du modèle, a été mis au point.

13.2. Dispositif expérimental

13.2.1. Principe général

Le principe de la manipulation est de lâcher dans un plan vertical un fil soumis à son propre poids, maintenu initialement horizontal par ses 2 extrémités. A l'instant initial t_0 , l'une des extrémités est lâchée. Dans cette configuration, le fil est considéré sollicité uniquement en flexion, la sollicitation de traction étant négligeable. Le dispositif permet de caractériser le comportement en flexion du fil par comparaison du tombé réel d'un fil à son tombé simulé.

L'obtention des paramètres inconnus d'un modèle passe par trois étapes successives :

- lâché de fil accroché sur le portique,
- prise d'images et analyse de celles-ci par un traitement d'images,
- simulation du modèle de fil et identification des paramètres inconnus par une méthode du modèle.

13.2.2. Dispositif de lâché de fil

Le lâché de fil nécessite un portique pour maintenir celui-ci à l'une de ses extrémités et pour lâcher l'autre à la demande de l'opérateur. Ce portique est composé d'un fond, de couleur choisie contrastante avec celle du fil étudié, d'une épingle maintenant l'une des extrémités et assurant un contact ponctuel, et d'une mâchoire commandée pneumatiquement (Figure III-3-2). Le déclenchement de l'ouverture de la mâchoire et le déclenchement de la prise d'images sont synchronisés.



Figure III-3-2 : Photo du portique de lâché et de la prise d'image

13.2.3. Le système de prise d'images

Le système de prise d'images est composé d'un portique, d'une caméra CCD, noir et blanc et d'un logiciel de traitement d'images. Le dispositif de mesure, mis au point pour cette étude, permet de capter une séquence d'images du tombé d'un fil, de la traiter et d'envoyer au programme d'identification les données qui lui sont utiles pour identifier les paramètres inconnus du modèle de fil.

D'un point de vue géométrique, le dispositif expérimental est défini par un plan vertical P (plan du portique) sur lequel évolue le fil (Figure III-3-3). Un éclairage adapté L permet de diffuser la lumière sans zone d'ombres.

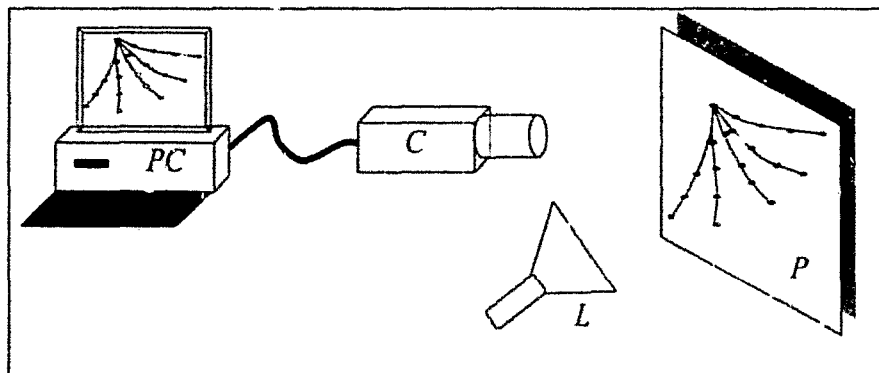


Figure III-3-3 : Schéma du dispositif de prise d'images

Au déclenchement de la prise d'images, 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 fournit une image de 512x512 pixels en 256 niveaux de gris. Le logiciel spécialement élaboré est un logiciel de reconnaissance du fil sur les différentes images de la séquence. Son intérêt est qu'il tient compte de la qualité de l'éclairage, de la couleur du fil, de sa longueur. Il est composé de traitements appropriés tels que :

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

13.2.4. Traitement des images

Cette section explique comment, à partir d'un ensemble d'images recueillies par la caméra, il est possible de déterminer la matrice d'évolution de points discrets du fil lors du tombé. 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. Pour être cohérent avec le modèle de fil, il est nécessaire d'extraire de la séquence d'images d'un tombé réel, l'évolution de points discrets du fil, ces points discrets correspondant impérativement aux nœuds définis dans le modèle (chapitre II). L'algorithme d'identification compare en réalité deux matrices de points et non pas deux images pixelisées de tombé de fil. Aussi, l'objectif de cet algorithme d'extraction est de faire coïncider la discrétisation en nœuds du modèle de fil avec des points analogue du fil, appelés points caractéristiques. Ces points sont issus d'un découpage du fil en section linéaire représentant les barres joignant chaque nœud du modèle. Cette stratégie permet de rester cohérent avec le principe de modélisation.

La Figure III-3-4 donne un exemple d'image prise dans une séquence d'images réelles. Cette figure servira d'exemple de base pour l'exposé de la méthode de discrétisation.



Figure III-3-4 : Une image lors du tombé du fil

Un étude de l'histogramme de l'image III-3-4 montre que l'objet fil ne peut être directement extrait par un simple seuillage. Ainsi, les problèmes posés par la non homogénéité de la lumière conduisent, dans un premier temps, à découper l'image en zones de forme rectangulaire (Figure III-3-5). Cela permet d'avoir un fond localement plus homogène et donc facilite le traitement d'images, mais oblige à utiliser un recadrage dynamique afin d'accentuer le contraste entre l'objet fil et le fond. De plus, un découpage en rectangles plus petits conduit à linéariser la courbure du fil. Cette linéarisation a l'avantage de simplifier l'algorithme de

reconnaissance du fil. La taille de ces rectangles est donc guidé par la nécessité de linéariser l'objet dans chaque rectangle. Ce choix peut être validé par le coefficient de linéarité α défini à la fin de cette section.

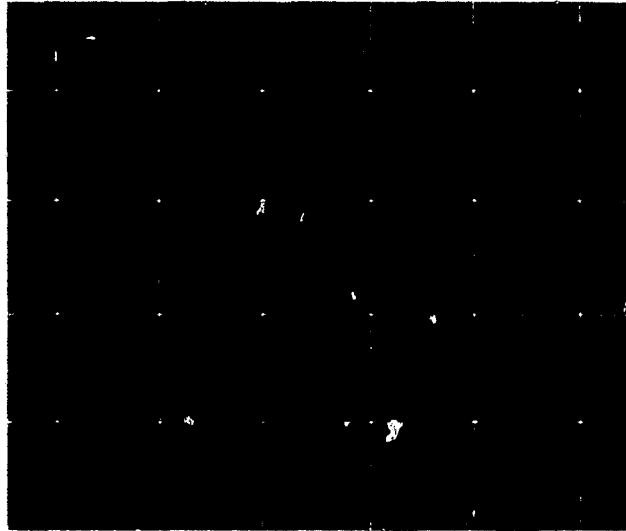


Figure III-3-5 : Image découpée

Le traitement d'image débute par une analyse de l'histogramme de chaque rectangle de l'image. L'expérience, comme toujours en Traitement d'Images, a montré que différentes techniques appliquées à l'histogramme permet de mettre en valeur l'information fil par rapport à l'information fond.

La procédure de travail débute par un recadrage dynamique de chaque zone de l'image. Ce recadrage utilise une table de conversion ou LUT (Look Up Table) représenté en Figure III-3-6-(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 [Traitement de l'image sur micro-ordinateur – J.J. Toumazet – Ed. Sybex - 251pages - 1987]. $N_{g,min}$, $N_{g,moy}$ et $N_{g,max}$ désignent respectivement le niveau de gris minimum, moyen et maximum de la zone. Pour cette table de conversion, tout pixel inférieur à $N_{g,moy}$ est considéré appartenant au fond. Dans le cas contraire, le pixel est considéré comme pouvant appartenir à l'objet fil.

La seconde phase de la procédure, dite de binarisation, garantit l'appartenance d'un pixel à l'objet fil. Le but de cette binarisation est d'extraire l'information du fil par rapport à l'information fond à qui est affecté le niveau de gris 0. Elle est réalisée à l'aide de la table de conversion de la Figure III-3-6-(b). s est le seuil de binarisation correspondant au nouveau niveau de gris moyen de la zone.

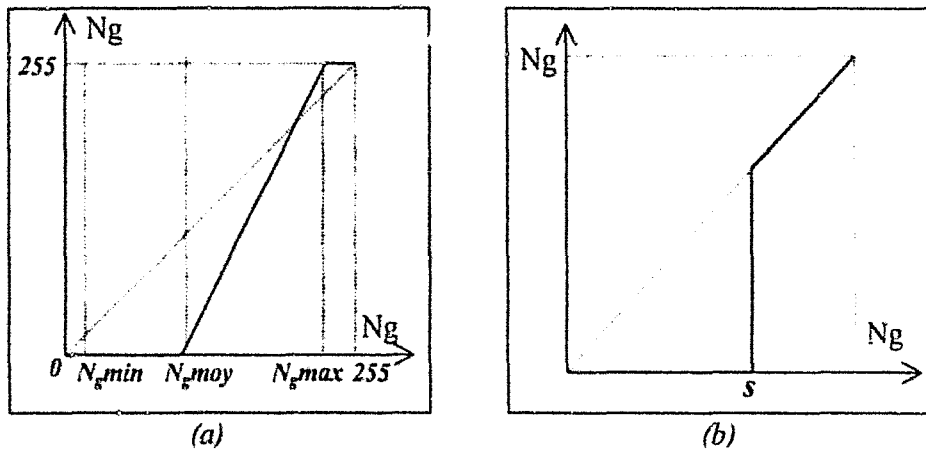


Figure III-3-6 : (a) LUT de recadrage dynamique (b) LUT de binarisation

Le résultat de ces traitements de type LUT est représenté en Figure III-3-7. On peut constater que ces traitement ont permis de séparer l'information "fil" de l'information "fond de l'image".

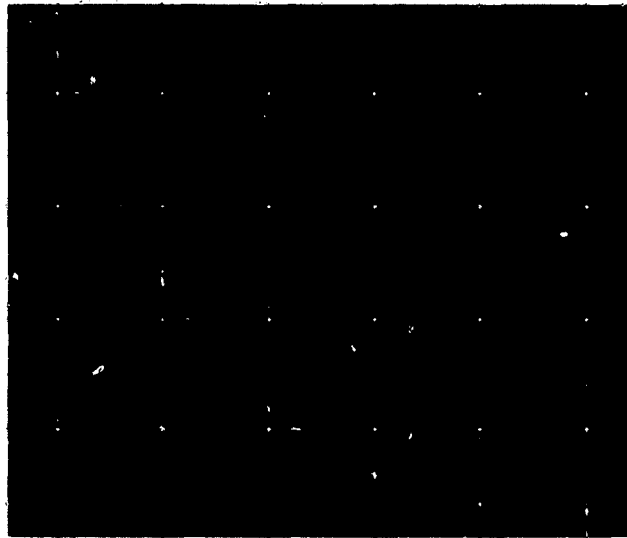


Figure III-3-7 : Rectangles binarisés .

La troisième phase de la procédure de traitement d'image permet de réduire le volume d'information. 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 a pour coordonnées :

$$\begin{cases} x_G = \frac{1}{M} \sum_i m_i x_i \\ y_G = \frac{1}{M} \sum_i m_i y_i \\ M = \sum_i m_i \end{cases}$$

Pour s'assurer que le point G est bien représentatif de la zone, une étude [BONN 95] [LEGR 96] est réalisée sur chaque zone (Figure III-3-8). Cette étude permet de vérifier la rectitude de l'objet de la zone. Pour cela, la matrice d'inertie A de la zone considérée est calculée à l'aide des formules suivantes :

$$A = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{21} & I_{22} \end{bmatrix}$$

avec

$$\begin{cases} I_{11} = \sum_i m_i (x_G - x_i)^2 \\ I_{12} = I_{21} = \sum_i m_i (x_G - x_i) (y_G - y_i) \\ I_{22} = \sum_i m_i (y_G - y_i)^2 \end{cases}$$

A partir des valeurs propres λ_1 et λ_2 de la matrice A , le calcul du coefficient de linéarité α permet d'évaluer dans quelle mesure le nuage de pixels décrit une droite passant par G . Ce coefficient s'écrit :

$$\alpha = \frac{|\lambda_1 - \lambda_2|}{|\lambda_1 + \lambda_2|}$$

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 qui est que l'objet "fil" dans chaque zone considérée se doit de définir au mieux un segment de droite. Dans le cas contraire, il peut être envisagé de re-découper l'image en zones plus petites.

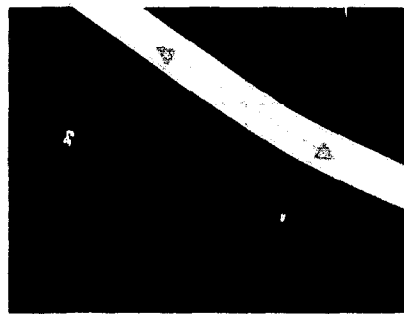


Figure III-3-8 : Inertie d'un rectangle.

Dès lors, connaissant l'ensemble des points G , noté ensemble des points caractéristiques, l'allure du fil est extraite de l'image.

La phase finale de traitement a pour but de redécouper la représentation du fil précédemment obtenue en autant de sections que définies par le modèle de fil. Ainsi, à partir des points caractéristiques et par extrapolation, le fil est rééchantillonné en autant de points que nécessaires pour sa comparaison au modèle. (Figure III-3-9)

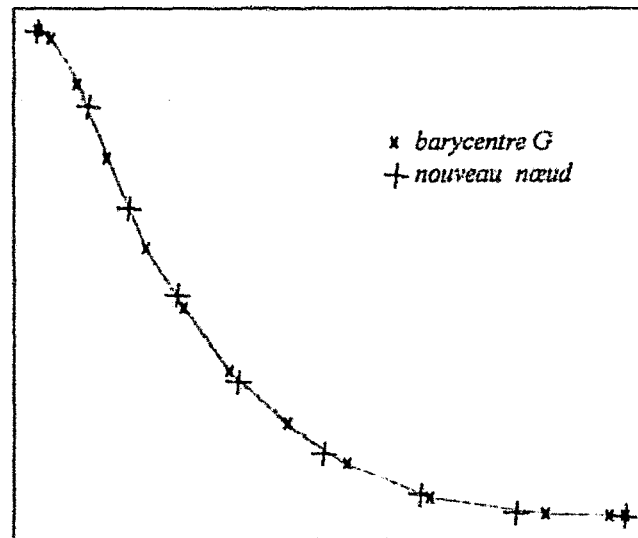


Figure III-3-9 : Redécoupage du fil.

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 déterminé en pixel et la compare à la longueur réel 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 III-3-10 sous la forme d'une matrice de points.

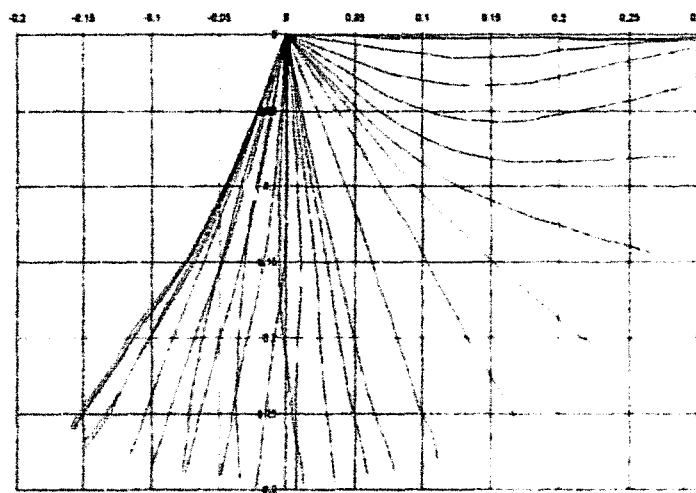


Figure III-3-10 : Tombé réel d'un fil.

13.3. Identification du paramètre C_f

13.3.1. Démarche méthodologique

La matrice de points issue de ce dispositif nous permet de confronter le tombé réel du fil (Figure III-3-10) avec celui issu de la simulation du modèle (Figure III-3-11). Dans notre cas de figure, la simulation du fil a été effectuée avec des paramètres conduisant à un tombé proche de la réalité. L'algorithme d'identification considère en entrée une matrice de coordonnées de points. Cette matrice de points est la liste des coordonnées des points d'évolution du fil réel de la Figure III-3-10 issue du Traitement d'Images. L'algorithme a pour fonction d'ajuster les paramètres du modèle afin de faire coïncider la matrice des coordonnées du tombé réel avec la matrice des coordonnées du tombé simulé.

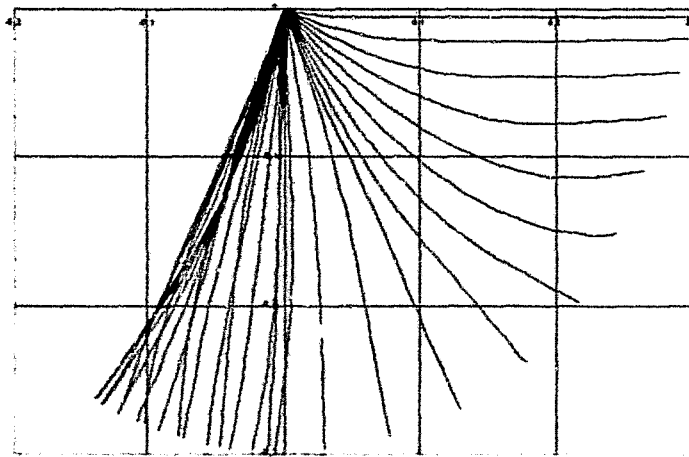


Figure III-3-11 : Tombé simulé d'un fil

13.3.2. Principe général

Le programme d'identification que nous avons écrit utilise les méthodes de programmation non linéaire. Les nombreuses non linéarité du modèle ont conduit au choix d'une méthode du modèle. Rappelons que cette technique d'identification nécessite de savoir simuler numériquement le modèle. Les algorithmes existants guident le choix de l'évolution des paramètres. Parmi différentes techniques, testées lors de travaux antérieurs [BRUN 88], c'est celle mise au point par Powell qui a été développée en langage C pour cette étude. Cet auteur a présenté deux méthodes d'évolutions des paramètres dans un espace multidimensionnel, nous utilisons la deuxième méthode de Powell [POWE 64] [RICH 71].

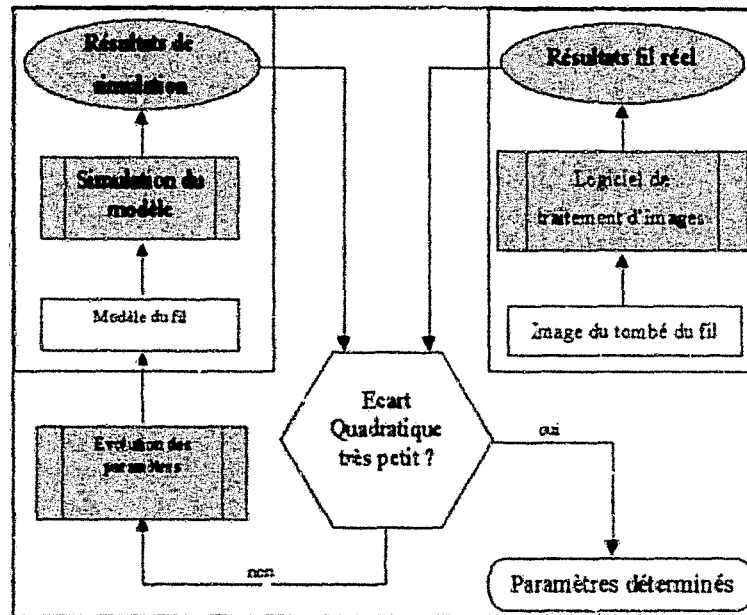


Figure III-3-12: Principe général de la méthode d'identification

Le schéma de la figure III-3-12 résume le principe général des méthodes de programmation non linéaires 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 issue du dispositif expérimental précédent. 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 premier cas, l'écart est important et nécessite de modifier les paramètres du modèle simulé par la stratégie de Powell. 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.

13.3.3. Méthodes utilisées

La méthode de POWELL est une technique d'identification permettant d'optimiser l'évolution des paramètres du modèle afin d'atteindre le minimum du critère quadratique le plus rapidement possible. Le principe est le suivant :

- initialisation de la Méthode de POWELL par la Méthode axe par axe,
- analyse de l'évolution paramétrique, recherche des directions conjuguées pour progresser de manière optimale dans l'espace paramétrique.

La méthode axe par axe, aussi appelée méthode de Gauss, permet d'évoluer dans l'espace paramétrique à l'aide d'une recherche mono dimensionnelle. Ainsi, d'un point A (Figure III-3-13), l'algorithme recherche le minimum d'une fonction f (paramétrée par P_1, P_2) sur l'axe P_1 , c'est-à-dire le point B . De ce point une autre minimisation de la fonction f est effectuée sur l'axe P_2 jusqu'au point C . L'opération est répétée (Points D, E, F) jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'évoluer dans l'espace paramétrique : une arête de résolution est alors atteinte.

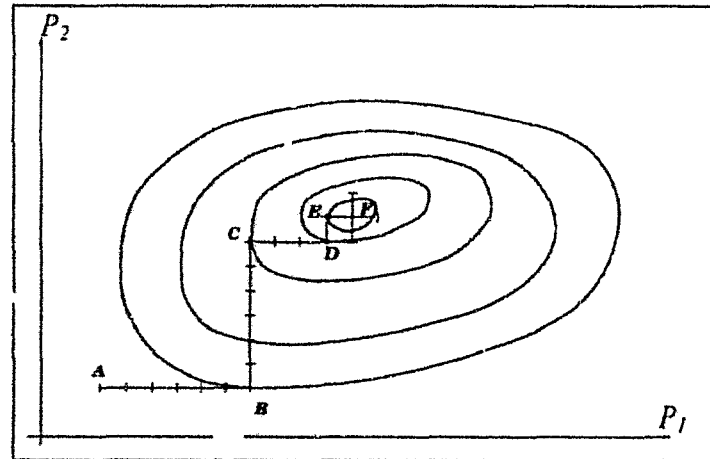


Figure III-3-13 : Méthode axe par axe

La méthode de Powell, appliquée à un espace paramétrique à 3 dimensions (P_1, P_2, P_3), débute par la méthode axe par axe, du point A_0 pour atteindre le point B_0 (Figure III-3-14). Nous évoluons ensuite sur la direction paramétrique conjuguée définie par le vecteur A_0B_0 jusqu'au minimum de critère obtenu en A_1 . A ce stade nous venons d'effectuer la première itération de Powell. Ensuite, à partir du point A_1 , un nouveau repère ($A_1, \vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{D}_3$) est construit. $\vec{P}_3$ est alors remplacé par $\vec{D}_3$ selon le critère de substitution sur les directions conjuguées, $\vec{P}_3$ étant l'axe ayant le plus évolué dans l'ancien repère.

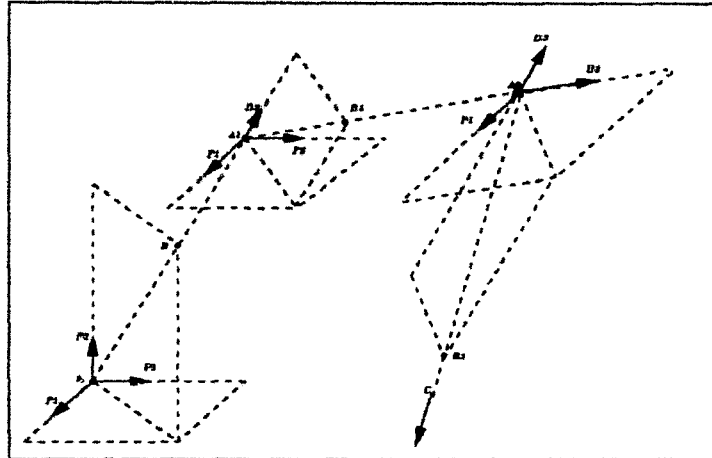


Figure III-3-14 : Méthode de Powell

En partant de $A1$, suivant le principe décrit précédemment, nous effectuons une nouvelle itération de Powell pour atteindre le point $A2$. Le repère $(A2, \vec{P1}, \vec{D2}, \vec{D3})$ est construit, $\vec{P2}$ devient $\vec{D2}$. De la même façon, nous concevons un dernier repère $(C, \vec{D1}, \vec{D2}, \vec{D3})$ après une nouvelle itération de la méthode. Nous atteignons ainsi l'optimum du premier cycle de cette méthode. D'autres cycles sont réitérés jusqu'à l'obtention du critère minimal souhaité.

13.3.4. Intérêts et limites de la démarche retenue

L'intérêt de la technique utilisée est qu'elle répond parfaitement à notre problème. Par contre, des études antérieures [BRUN 88] ont démontré que le vecteur initial des paramètres devait être assez proche du vecteur à trouver pour éviter de tomber sur des minima locaux.

13.3.5. Réglages préliminaires à l'identification

13.3.5.1. Détermination du retard pour la synchronisation

Un problème de synchronisation, inhérent à tout dispositif de mesure de régime transitoire, s'est posé : impossibilité de synchroniser parfaitement le lâché de l'extrémité du fil avec le déclenchement de la prise d'images. Un décalage temporel apparaît nettement et est considéré pour l'identification comme un retard. Aussi, il a été nécessaire de rajouter un décalage temporel lors de la simulation de tombé de fil. Le logiciel d'identification doit détecter ce retard avant d'identifier les paramètres inconnus. De plus, et ce, afin de capturer l'image relative à l'instant 0 du lâché de fil, il a été décidé de déclencher d'abord la prise d'images.

Ceci allonge fortement le temps de calcul nécessaire à l'identification, mais garantit la validité du paramètre de flexion ainsi identifié.

13.3.5.2. Réglage des paramètres de l'algorithme

Comme il a été précisé précédemment, la méthode d'identification choisie est très sensible au choix du vecteur paramètre initial. Aussi, pour tenir compte de ce problème, faut-il choisir le vecteur initial le plus proche possible du résultat. Cette stratégie permet entre autre de diminuer le temps de calcul. Pour cela, il est préconisé d'étudier la sensibilité paramétrique du modèle [LEGR 00/3]. Une telle étude permet d'approximer les paramètres du fil et guide pour un bon choix du vecteur paramètre initial.

L'arrêt de l'algorithme d'identification est donné par l'erreur commise que l'on admet sur la valeur du paramètre à identifier. Ce choix est libre pour l'utilisateur. Cependant, le temps de calcul est fonction de cette erreur admise. Ce choix est donc un compromis entre temps de calcul et erreur admissible.

14. Analyse du comportement en propagation

14.1. Objectif

L'objectif de cette section est de justifier le choix de la période d'échantillonnage. L'intégration de l'équation différentielle établie à la section 2-4-1, équation (7) du chapitre précédent, nécessite un échantillonnage temporel de période te (soit $t = n te$). Le choix de te est guidé par le respect des contraintes de Shannon. Ce choix est délicat. Toutefois, en première approximation, Shannon indique que te doit être au moins deux fois plus petit que la plus petite constante de temps du système. Dans notre cas, il est possible d'estimer expérimentalement cette constante de temps en étudiant la réponse du fil à une sollicitation mécanique en forme de créneau.

Le choix de la période d'échantillonnage te se fait donc à partir des caractéristiques intrinsèques du matériau.

Ainsi, c'est à partir de la vitesse de propagation d'une onde plane dans le matériau qu'est déterminée cette période d'échantillonnage.

14.2. Dispositif expérimental

Le dispositif a été développé au sein du laboratoire dans le cadre d'une thèse sur la fatigue des câbles [FERR 96] (Figure III-4-1).



Figure III-4-1 : Appareillage de mesure

Le fil, fixé d'un côté et prétendu par une masse m de l'autre, est maintenu horizontalement. Le dispositif électronique est composé de deux émetteurs récepteurs piézo-électriques comme schématisés Figure III-4-2. Les deux émetteurs récepteurs sont séparés d'une distance d connue et reposent sur le fil. Le premier émetteur récepteur C_e fonctionne en émetteur piloté par un générateur. Le second C_r fonctionne en récepteur. Les deux capteurs sont reliés à un oscilloscope.

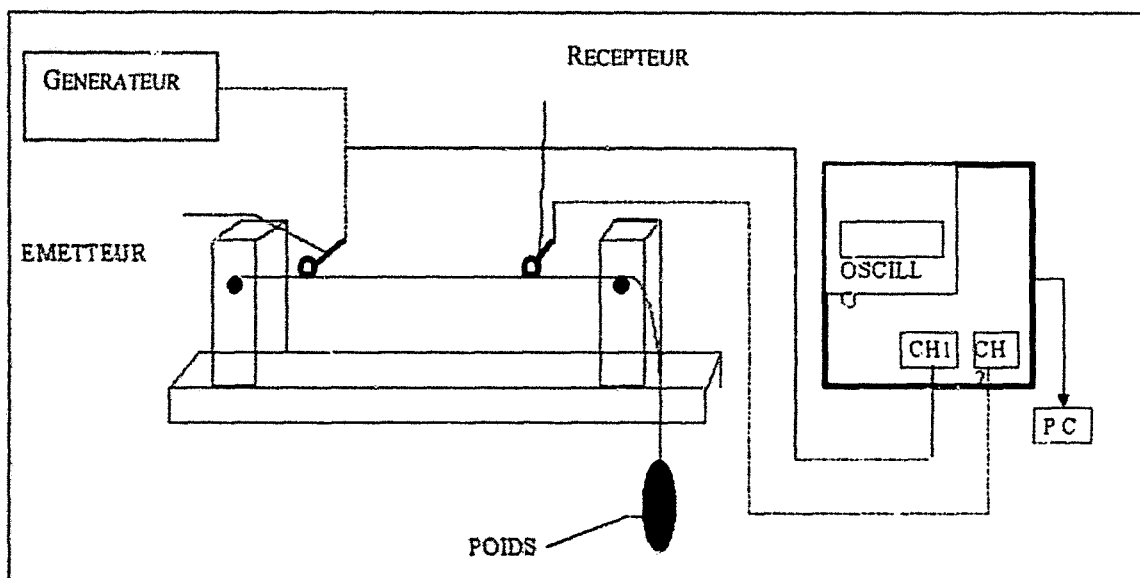


Figure III-4-2 : Schéma de l'appareillage

A l'instant t_0 , le générateur d'impulsion donne l'ordre d'émettre à C_e une onde plane de forme créneau dans le fil prétendu. Celle-ci atteint le capteur C_r à l'instant t_1 . En déterminant le déphasage entre l'émission et la réception du signal à l'aide de l'oscilloscope (Figure III-4-3),

il est possible de calculer le temps de propagation $T=t_f-t_0$ que met l'onde mécanique pour parcourir la distance d .

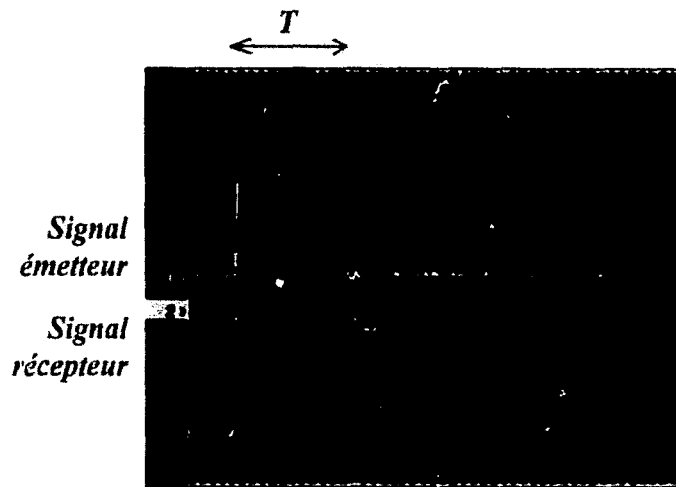


Figure III-4-3 : Ecran d'oscilloscope

Il est possible de mesurer le déphasage T directement sur l'écran de l'oscilloscope (Figure III-4-3). La vitesse de propagation vaut alors :

$$V = \frac{d}{T}$$

14.3. Choix des conditions opératoires

Ce dispositif étant un prototype et n'ayant pas été conçu directement pour l'utilisation qu'il en est fait pour ces travaux, il est important de vérifier que les trois paramètres que sont la longueur de l'éprouvette, la masse de tension et la longueur de la pulsation n'influencent pas la mesure. De plus, cette étude permet de choisir de façon optimale les conditions opératoires.

14.3.1. Influence de la longueur de l'éprouvette

Quelques mesures de la vitesse pour des longueurs d'éprouvette différentes ont été réalisées. Elles conduisent à la conclusion suivante : la longueur n'influence la mesure qu'à hauteur de $\pm 0.33\%$. La courbe de la Figure III-4-4 quantifie cette valeur.

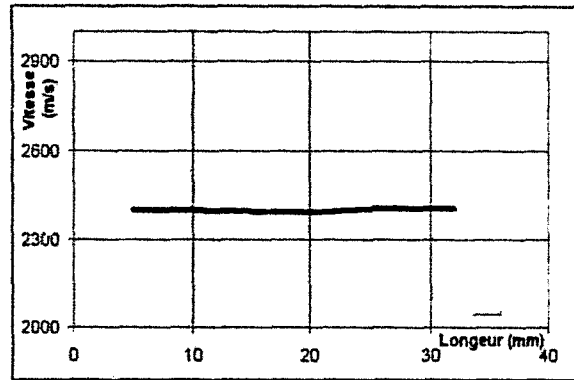


Figure III-4-4 : Influence de la longueur de l'éprouvette

14.3.2. Influence de la longueur de l'impulsion

Par la Figure III-4-5, il est possible de constater que la longueur de l'impulsion émise n'influence la mesure qu'à hauteur de $\pm 0.05\%$.

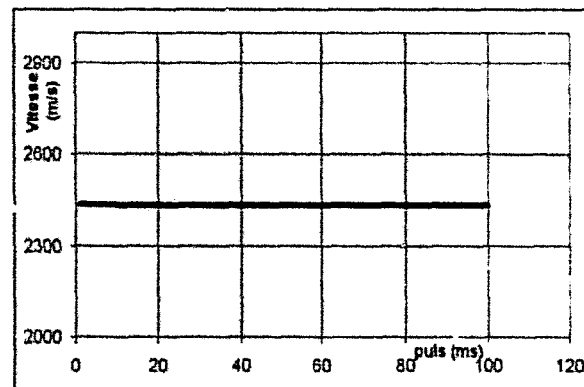


Figure III-4-5 : Influence de la longueur de la pulsation

14.3.3. Influence de la masse de prétention du fil

Comme nous nous en doutions, la masse de tension du fil a davantage d'influence que les autres paramètres réglables sur la mesure de la vitesse. Cette masse n'influence la mesure qu'à hauteur de $\pm 1.72\%$. (Figure III-4-6)

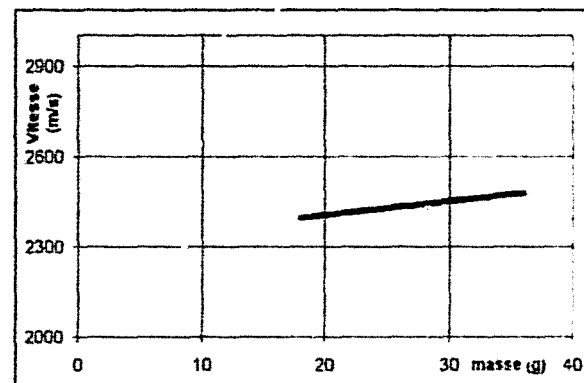


Figure III-4-6 : Influence de la masse de tension

14.3.4. Choix réalisé

Si la longueur de l'éprouvette et la longueur de l'impulsion peuvent être considérées comme non-influente sur la mesure, l'étude sur la masse de pré-tension a montré très logiquement qu'elle intervenait davantage sur cette mesure. Cependant, compte tenu de l'application du théorème de Shannon qui indique de prendre au moins deux fois la fréquence du système étudié, une erreur de près de 2% sur la mesure est sans conséquence sur le choix de la période d'échantillonnage.

Afin d'assurer de bonnes conditions opératoires, il a été fait le choix de considérer un fil tendu par une masse de 0.5g/Tex. L'écartement entre les capteurs est fixé à 80mm et la longueur de l'impulsion est de 10 ms.

14.4. Choix de la période d'échantillonnage t_e

Une fois la vitesse de propagation du fil mesurée, il est possible de déterminer la période d'échantillonnage t_e du matériau. Pour cela, connaissant la longueur moyenne initiale l_0 des barres des mailles de la structure étudiée, on a :

$$t_e^* = \frac{l_0}{V}$$

Afin de respecter le théorème de SHANNON, t_e est choisie environ 10 fois inférieure :

$$t_e \approx \frac{l_0}{10 V}$$

15. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de donner les méthodologies utilisées pour déterminer la valeur des paramètres du modèle. L'étude des différents comportements mécaniques a permis de mettre au point une stratégie de travail tant d'un point de vue modélisation que d'un point de vue identification. L'association entre les différents comportements mécaniques du fil et leurs tests a été stratégique pour l'identification. La classification des paramètres en sous espaces paramétriques, en s'appuyant sur le principe de superposition, a permis d'établir pour chaque comportement mécanique du fil, une méthodologie de test. Les différents tests retenus et leurs modes opératoires ont été explicités. Tous les outils nécessaires ont été développés et

expliqués. Il est donc maintenant possible d'identifier l'ensemble des paramètres du modèle de fil.

A partir de tests simples, classiques et robustes, il est possible d'identifier le modèle. Seul le temps de calcul pose encore des problèmes qui peuvent être résolus par des moyens informatiques appropriés tels que la parallélisation des tâches sur plusieurs calculateurs : clustering. La robustesse des essais vis à vis des paramètres a été garantie par une étude paramétrique. [LEGR 00/1]

Le chapitre suivant va s'attacher à présenter les différents logiciels de simulation du tissu à partir de la connaissance du fil. Des exemples de l'application des méthodologies de test définis dans ce chapitre seront présentés. La comparaison des simulations de tissus avec leurs comportement réels validera le modèle de tissu proposé.

Chapitre IV

Résultats et validation

Résultats et validation	87
1. Introduction	87
2. Les logiciels développés	88
2.1.1. Le logiciel de simulation	88
2.1.2. Le logiciel de visualisation	91
3. Résultats d'identification des paramètres de fils	92
3.1. Présentation des fils étudiés	92
3.2. Comportement en traction	92
3.2.1. Traction sans vitesse	93
3.2.2. Relaxation	95
3.2.3. Hystérésis	97
3.3. Comportement en flexion	99
3.4. Comportement en propagation	101
4. Résultat de simulation et comparaison aux tests réels en traction mono axiale	101
4.1. Présentation des tissus étudiés	101
4.2. Conditions initiales de simulation et du test réel	102
4.3. Tissu de siège automobile A1 : armure toile	103
4.4. Tissu de store : armure cannelé 2-2	104
4.5. Fil de siège automobile A2 : armure sergé de 3	105
5. Résultats complémentaires	106
5.1. Déchirure en traction	106
5.2. Test de poinçonnement	107
6. Conclusion	109

Résultats et validation

1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus et a pour objectif de valider tout ou partie des hypothèses faites tout au long de ce travail de recherche. Au besoin, les limites de validités de certains choix adoptés sont précisées.

Le chapitre est structuré en quatre sections.

Le première section présente les logiciels de simulation du tissu à partir de la connaissance du fil. L'algorithme de simulation, permettant le passage des paramètres du fil aux comportements du tissu, est détaillé dans son ensemble. Ensuite, les possibilités du logiciel de visualisation sont présentées.

La deuxième section donne l'ensemble des résultats d'identification définis dans le chapitre précédent. Chacun des sous modèles de comportement du fil est testé par des essais spécifiques sur trois types de fils différents. La comparaison des essais réels et des essais simulés du fil valide le modèle de fil. Au delà, ces résultats conduisent à une approche plus fine du fil.

La troisième section a pour objectif de valider l'intégration du modèle de fil dans le modèle de tissu. Pour cela, trois types de tissus ont été choisi dans des domaines d'application différents. Le banc de test pour effectuer cette validation est le banc de traction. Le test de traction est le plus simple car le plus courant à réaliser. De plus, les courbes de traction semblent les plus aptes à permettre la validation. Une analyse entre les courbes de traction simulées et les courbes réelles montre que le modèle de tissu est proche de la réalité, mais il est toujours possible de l'améliorer.

La dernière section présente quelques essais complémentaires. Un test de poinçonnement permet de démontrer que ce modèle travaille en trois dimensions. La déchirure en traction permet de montrer la capacité du modèle à prendre en compte le changement brutal de conditions limites.

La conclusion montre que cette phase de validation permet de dire que l'objectif de ce travail de thèse est en passe d'être atteint.

2. Les logiciels développés

Afin de mettre en œuvre le modèle de tissu exposé au chapitre II, il a été nécessaire de développer une structure logicielle spécifique qui intègre deux algorithmes. Le premier met en œuvre le modèle de tissu avec ses paramètres associés, le second permet de visualiser de manière souple l'évolution du tissu en trois dimensions.

2.1.1. Le logiciel de simulation

L'outil qui permet de valider le modèle de tissu défini au chapitre II, est le logiciel de simulation (Figure IV-2-1). Ce logiciel doit d'une part prendre en compte tous les paramètres intrinsèques du tissu et d'autre part permettre la simulation de l'évolution de ce tissu quelles que soient les contraintes imposées. Pour cela, il a été nécessaire de décomposer le logiciel de simulation en deux étapes :

- Etape 1 : initialisation des paramètres mécaniques et géométriques du modèle et des contraintes extérieures,
- Etape 2 : calcul de l'évolution de la structure pour tout type de sollicitation.

L'initialisation des paramètres mécaniques et géométriques du modèle débute par la définition des paramètres mécaniques du fil. Les données introduites correspondent aux paramètres des différents sous modèles explicités au chapitre III que sont le comportement en traction, le comportement en flexion et le comportement en propagation. Ensuite, la mise en place du modèle de tissu nécessite de définir sa structure géométrique. Il est alors nécessaire d'introduire la géométrie du fil ainsi que les données de fabrication du tissage. Pour cela, on prend en compte le diamètre du fil, sa matière, son titre, l'armure du tissu, son retrait, son embuvage, ses réductions. A l'issue de cette phase d'initialisation, la simulation de la géométrie du tissu est réalisée. A partir des données de tissage et du fil, le parcours de chaque fil de chaîne et de trame est simulé afin de récupérer les positions réelles prises par les points d'entrelacement (points de croisure). Cette approche permet d'appliquer le modèle à tout type de texture.

La mise en place des conditions initiales relatives aux sollicitations est traduite en forces ou en déplacements. Ces conditions sont appliquées sur les points d'entrelacement appelés nœuds dans la définition du modèle donnée au § II.3.3. Par exemple, dans le cas de l'encastrement d'un nœud, tout déplacement est interdit à ce nœud. Dans le cas d'une sollicitation de traction, celle-ci est traduite soit par un gradient de force répartie, soit par un déplacement imposé, par période de temps Te , à chaque nœud au bord du tissu. L'analyse des

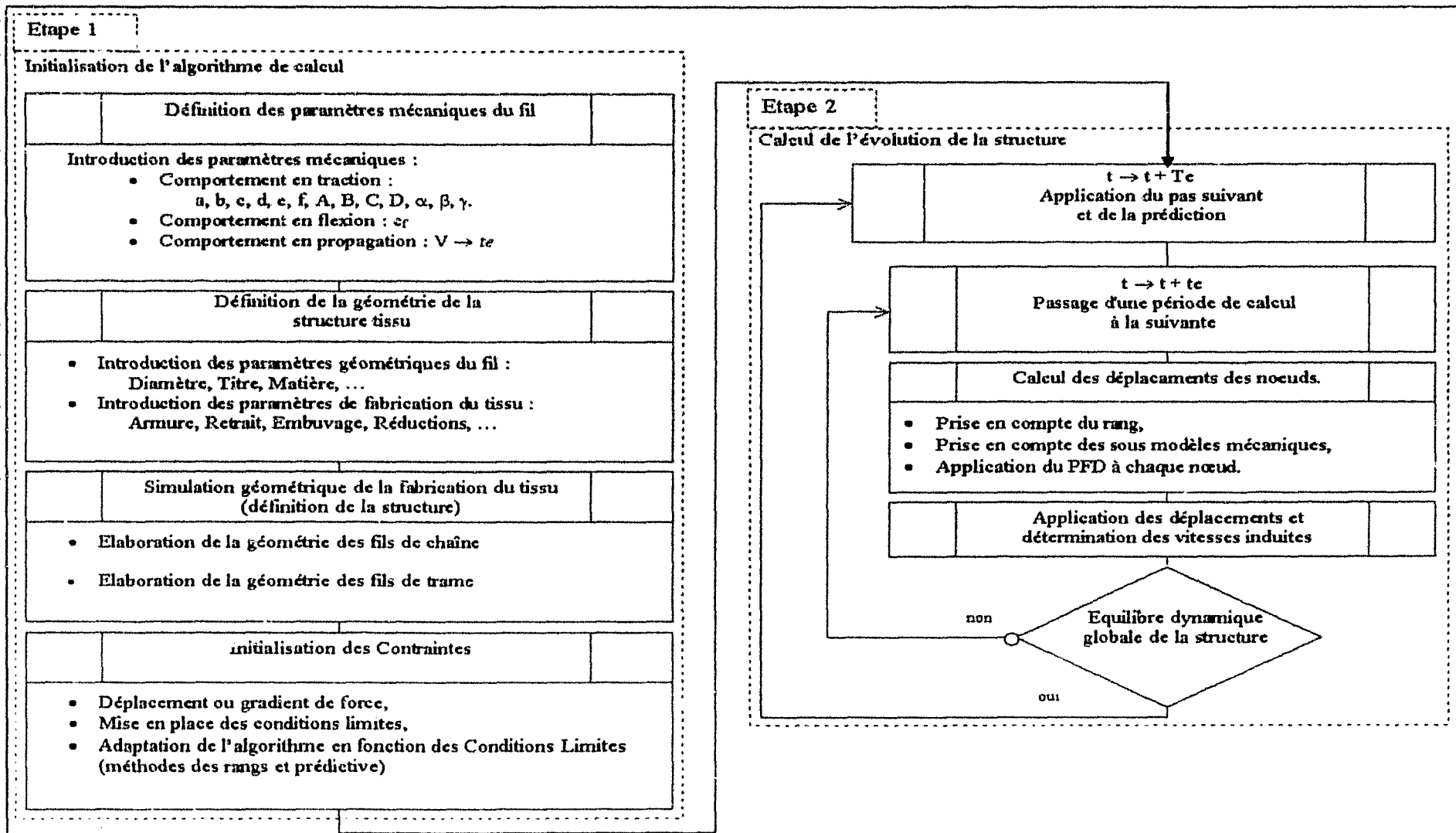


Figure IV-2-1 : Logiciel de simulation

conditions limites ainsi définies permet d'adapter l'algorithme de calcul. Les nœuds libres se voient attribués un rang selon leur "distance" aux conditions limites : c'est l'application de la méthode des rangs définie au § II.4.2.1. Il est alors possible d'appliquer la méthode prédictive du § II.4.2.3.

La seconde phase du logiciel est dédiée à la simulation proprement dite : c'est le calcul de l'évolution de la structure sous sollicitation. Elle est composée de deux boucles imbriquées. Cette imbrication de boucles traduit la méthode de multi-échantillonnage définie au § II.4.2.2. La boucle externe est liée à la période T_e , et correspond à l'échelle de temps du tissu. La boucle interne, dite boucle de propagation et liée à la période t_e , correspond à l'échelle du fil. Lors de la première boucle, on applique sur la structure tissu, à chaque période T_e , les déplacements ou les gradients de force réparti comme défini dans les conditions limites. Les nœuds libres sont alors déplacés selon la prédiction. La mise en œuvre de la propagation de ce phénomène dans le tissu est effectuée dans la boucle interne. L'objectif est alors de déterminer le déplacement de chaque nœud, de l'appliquer et de calculer les vitesses induites pour la période t_e considérée. L'équilibre dynamique global de la structure constitue le critère d'arrêt de la boucle de propagation. En effet, cette équilibre garantit l'amortissement de l'onde mécanique propagée.

Dans le souci de réduire le temps de calcul, l'interface utilisateur, courant en ressources, est quasi inexistante. L'ensemble des paramètres du modèle est directement intégré dans la partie logicielle. Cette intégration fera l'objet d'un développement spécifique ultérieurement. Par contre, l'aspect visualisation a été fortement développé afin d'appréhender plus finement et plus rapidement l'évolution dynamique de la structure. L'étude de ce logiciel de visualisation fait l'objet de la section suivante.

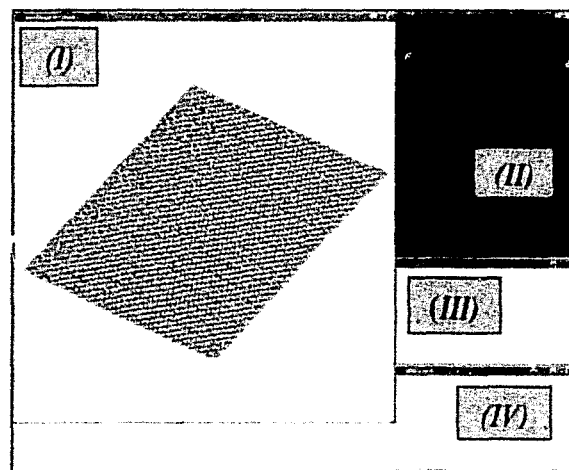


Figure IV-2-2 : Logiciel de visualisation

2.1.2. Le logiciel de visualisation

L'objectif de ce logiciel est de permettre la visualisation de toute information utile à la bonne compréhension du modèle de tissu. Il permet, en effet, de suivre, au besoin, l'évolution dynamique de n'importe quel nœud de la structure tissu.

Au contraire du logiciel de simulation, l'interface utilisateur propose une présentation fenêtrée et graphique (Figure IV-2-2). Elle a été réalisée grâce à la bibliothèque GLUT (Graphics Library Utility Tools) surcouche logiciel d'Open-GL [KILG 96]. L'interface graphique est composée de 4 fenêtres :

- une fenêtre de visualisation graphique (I) permet de faire évoluer en 3 dimensions la structure tissu, selon 6 degrés mécaniques de liberté. Les déplacements de la souris combinés à l'action sur l'un de ses 3 boutons donnent à l'utilisateur la possibilité de zoomer la structure, de translater le panoramique ou de tourner autour de l'objet tissu.
- une fenêtre de visualisation (II) des valeurs des différentes variables en un nœud sélectionné interactivement sur la précédente fenêtre : déplacement, vitesse, accélération, force, ...
- deux fenêtres (III) & (IV) hébergeant respectivement le tracé de la force fonction de l'allongement et le tracé de l'énergie fonction de l'allongement

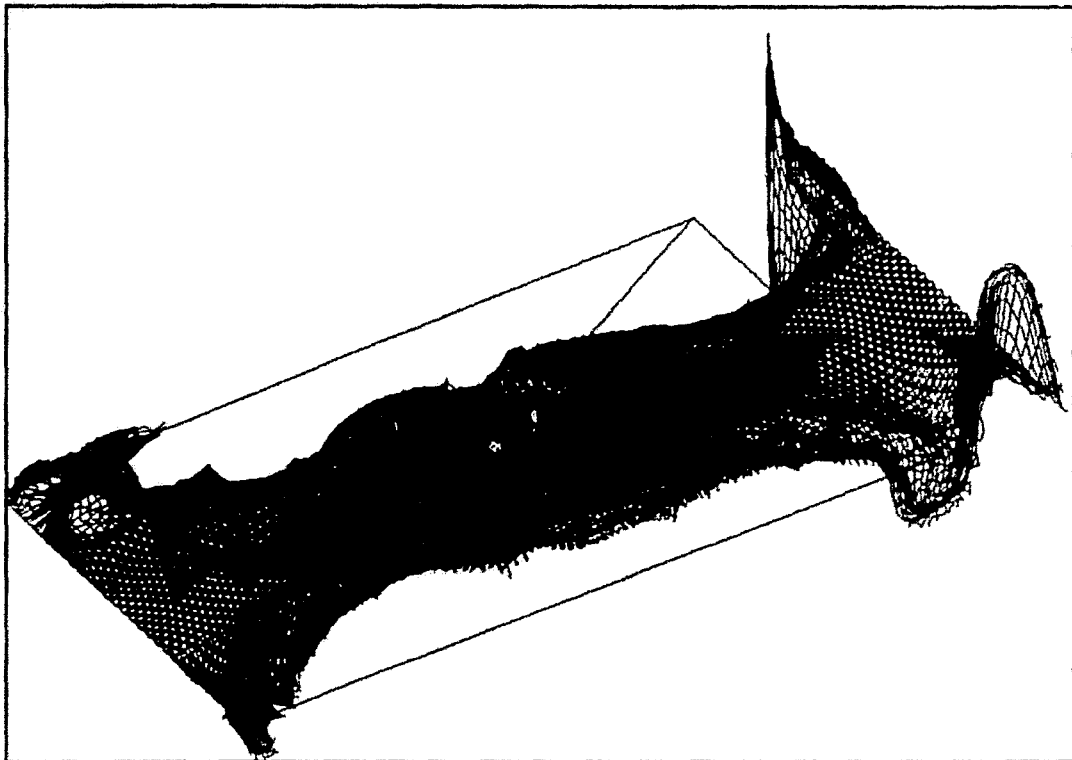


Figure IV-2-3 : « Explosion de la structure » du à un sous échantillonnage

Ce logiciel est un outil de développement très important qui contribue à l'évolution du modèle par la souplesse de l'observation. L'analyse visuelle des phénomènes mécaniques permet d'être « proche de la matière » et d'être sensible au modèle. Le logiciel a, en effet, permis de détecter les défauts dus à de mauvais choix. Par exemple, une valeur de t_e trop élevée (non respect du théorème de Shannon) peut conduire à « l'explosion » de la structure. (Figure IV-2-3) Cette « explosion » traduit une divergence de l'algorithme.

3. Résultats d'identification des paramètres de fils

Afin de valider le modèle dans le cadre des tissus techniques, 3 tissus ont été choisis dans deux domaines d'application distincts : le secteur des sièges automobile et le secteur des stores à usage industriel. L'objet de ce paragraphe est d'identifier les paramètres des fils associés à ces tissus. Il apparaît alors qu'en dépit des contraintes modérées qu'ils supportent, ces fils répondent à un cahier des charges de tissu à usage technique.

3.1. Présentation des fils étudiés

Les 3 fils sont choisis dans deux classes de structures filamenteuses différentes. La première classe caractérise l'aspect monofilamentaire, la seconde l'aspect fibreux.

Le fil de store est issu de la première classe ; c'est un monofilament. Il est en Silionne enduit PVC. Son titre est de 970 dTex (dg/km). Sa section est circulaire. Il est noté par la suite : fil *Sl*.

Les deux fils pour siège automobile appartiennent, pour leur part, à la seconde classe. Ce sont des fils fibreux obtenus par un procédé de filature conventionnel pour une matière synthétique.

Le premier est un polyester teint masse. Son titre est de 830 dTex. Il est noté *A1*.

Le second est lui aussi un polyester teint masse. Son titre est de 870 dTex. Il est noté *A2*.

Ils sont tous les deux de section quasi circulaire et sont voisins, ce qui permet de vérifier la sensibilité du modèle fil.

3.2. Comportement en traction

Tel qu'indiqué au § III-2, le sous modèle de comportement en traction se décompose en trois parties :

- la traction purement élastique caractérisée par les coefficients a, b, c, d, e, f ,
- la relaxation caractérisée par les coefficients A, B, C, D ,

- l'hystérésis caractérisée par les coefficients α , β , γ .

Le système d'équation suivant rappelle le modèle de traction adopté pour cette étude :

$$f_r(\xi, \dot{\xi}, t) = \begin{cases} a \xi + b + c \sin(d(\xi - e)) e^{f(\xi - e)} + A e^{Bt} + C e^{Dt} & \text{si } \dot{\xi} \geq 0 \\ F(\xi) = e^{\alpha(\xi - \beta)} - 1 & \text{si } \dot{\xi} < 0 \\ \text{avec } \alpha = \gamma \ln(\xi_l) + 1 \end{cases}$$

Il est important de rappeler que ce sous modèle est basé sur le principe de superposition. Ainsi, chaque sous comportement peut être étudié et validé séparément.

3.2.1. Traction sans vitesse

Cette section étudie la traction sans vitesse modélisée par l'équation suivante :

$$f_r(\xi) = a \xi + b + c \sin(d(\xi - e)) e^{f(\xi - e)}$$

La courbe expérimentale de traction sans vitesse est obtenue à partir de la courbe représentant la moyenne des courbes expérimentales de traction à vitesse $V=10\text{mm/min}$, à laquelle sont soustraits les effets de relaxation pour cette même vitesse (§ III-2-4-3).

Les figures IV-3-1, IV-3-2, IV-3-3, représentent les courbes d'allongement respectives des fil A1, St, A2. L'abscisse représente le pourcentage d'allongement, l'ordonnée les forces de traction en Newton. Ces figures comparent la courbe expérimentale à la courbe simulée. Le tableau figurant en bas à droite de chaque figure donne les valeurs des paramètres du modèle issues de l'identification.

Quels que soient les fils étudiés, la superposition des courbes simulées et réelles valide le choix du modèle. En effet, elle met en évidence que le modèle traduit au mieux les différentes phases de déformations du fil en traction. Ceci est particulièrement visible pour l'essai de traction du fil A1.

A ce stade, il est possible de dire que le sous modèle de traction sans vitesse est validé. Il traduit bien la réalité.

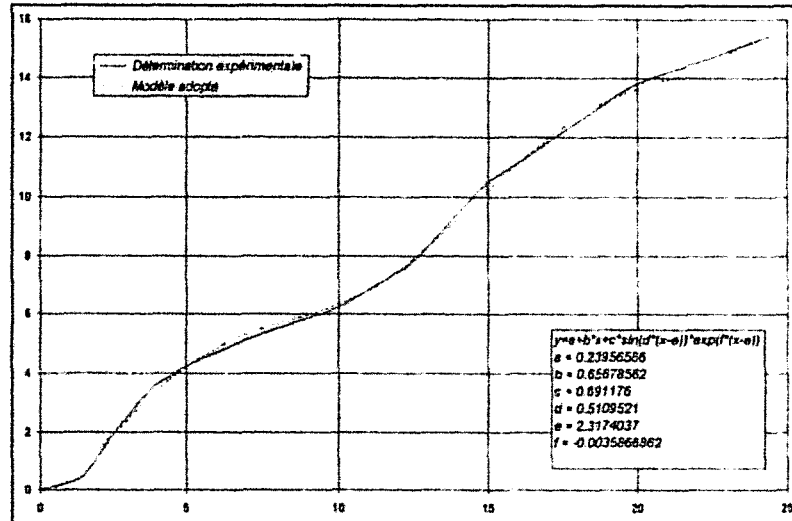


Figure IV-3-1 : Traction sans vitesse du fil A1.

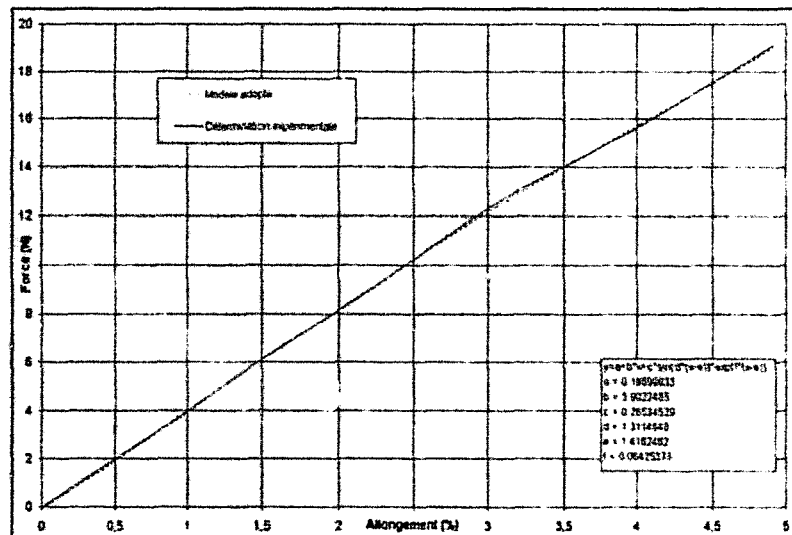


Figure IV-3-2 : Traction sans vitesse du fil ST.

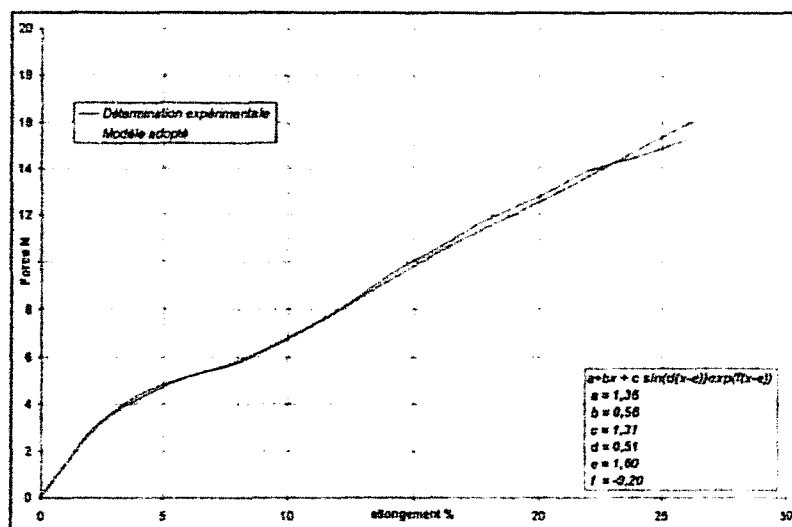


Figure IV-3-3 : Traction sans vitesse du fil A2.

3.2.2. Relaxation

L'équation représentative de la relaxation est la suivante :

$$R(t) = F + A e^{Bt} + C e^{Dt}$$

Les courbes expérimentales de relaxation ont été obtenues en maintenant à déformation constante le fil pendant une durée importante, prépondérante par rapport aux phénomène étudié. Une traction préalable détermine, pour chaque courbe de relaxation, l'état initial (ξ, F) constitué du couple allongement - force. Aussi, très logiquement, les paramètres A, B, C, D dépendent de cet état initial de relaxation.

L'abscisse représente le temps en seconde, l'ordonnée la force de traction en Newton. L'ordonnée de départ est la force initiale de l'essai (F).

Les figures IV-3-4, IV-3-5, IV-3-6, représentent les courbes de relaxation respectives des fil *A1*, *St*, *A2* réelles et simulées.

L'analyse de ces figures montre que les courbes simulées sont très proches des courbes réelles. Ceci prouve la bonne adéquation du sous modèle de relaxation avec la réalité.

La comparaison entre les trois fils montre que dans certains cas (fil *St*) l'effet de la relaxation est quasi inexistant. Cette remarque permet de dire que ce fil *St* est très linéairement élastique. Il ne semble pas sensible aux effets de la vitesse. Ceci conforte l'hypothèse faite au § III.2.4.3.1 selon laquelle la relaxation et l'influence de la vitesse sur le comportement en traction sont liées.

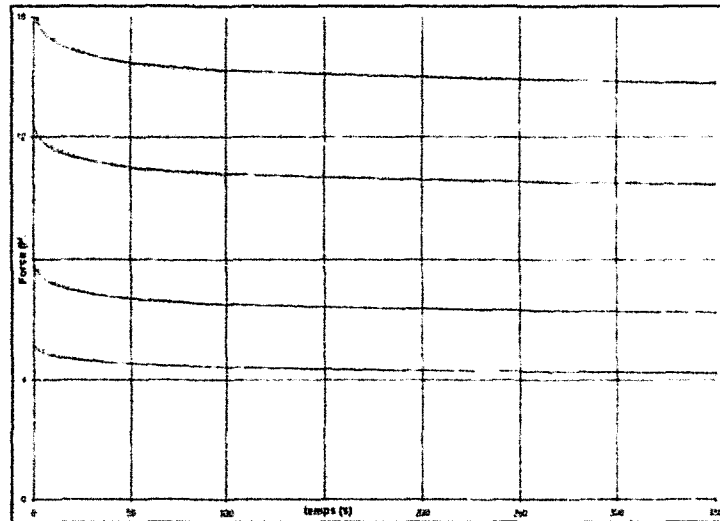


Figure IV-3-4 : Relaxation du fil A1.

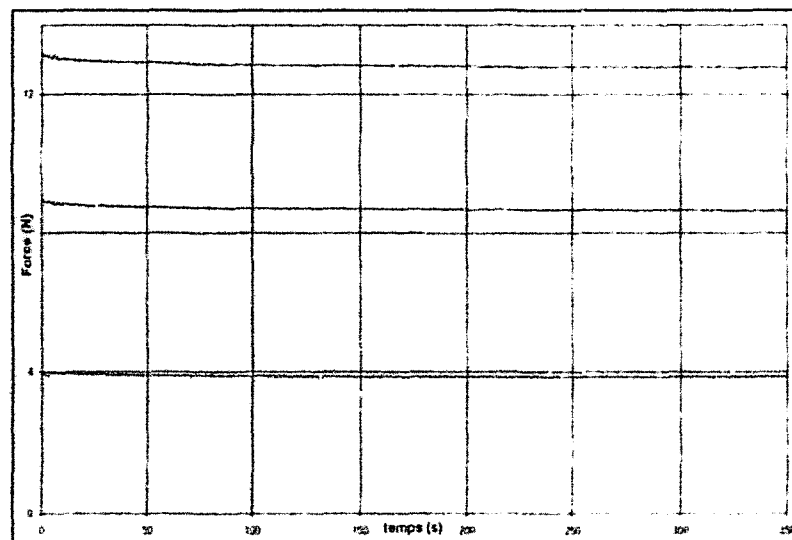


Figure IV-3-5 : Relaxation du fil St.

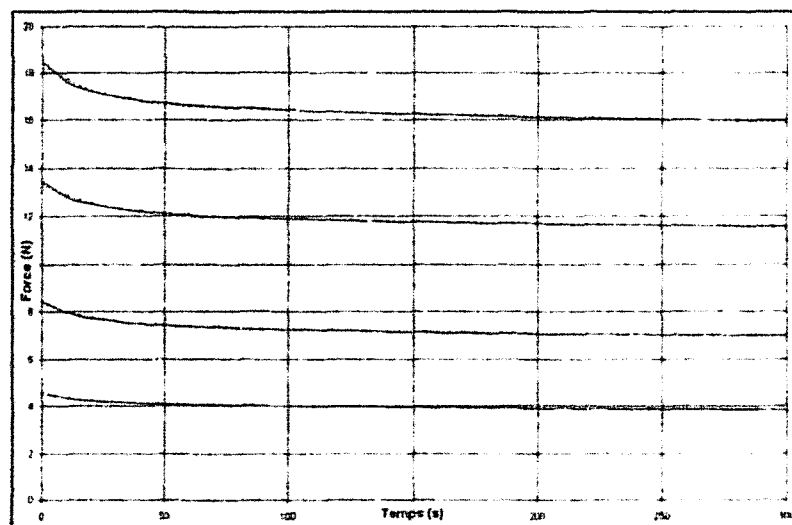


Figure IV-3-6 : Relaxation du fil A2.

3.2.3. Hystérésis

Le phénomène d'hystérésis est modélisé par l'équation suivante :

$$F(\xi) = e^{\alpha(\xi-\beta)} - 1$$

avec $\alpha = \gamma \ln(\xi_1) + 1$ et $\beta = \xi_1 - \frac{1}{\alpha} \ln(F_1 - 1)$

Expérimentalement, les courbes d'hystérésis ont été obtenues en mesurant la force de traction lors d'un gradient de déformation négatif après une traction préalable à gradient de déformation positif. Chaque courbe se caractérise donc par son état initial (ξ, F) constitué du couple force - allongement et par deux vitesses de traction la première positive et la seconde négative. Le point d'arrêt de chaque courbe se définit par une force nulle.

Les figures IV-3-7, IV-3-8, IV-3-9 représentent des courbes d'hystérésis respectives des fil *A1*, *St*, *A2*. L'abscisse représente le pourcentage d'allongement, l'ordonnée les forces en traction en Newton.

Dans les cas des fils *A1* et *A2*, la superposition des courbes réelles et simulées montre que le modèle est très proche de la réalité quel que soit l'état initial (ξ, F) . Par contre, dans le cas du fil *St*, le modèle montre ses limites. La linéarité de ces courbes d'hystérésis ne peut pas être prise en compte de par la fonction utilisée pour modéliser ce phénomène. Cette fonction a en effet été choisie pour sa capacité à représenter au mieux la courbure. Cependant, dans ce cas de figure particulier, l'effet d'hystérésis pour le fil est extrêmement faible. On peut donc faire l'hypothèse que ce fil ne présente pas d'hystérésis.

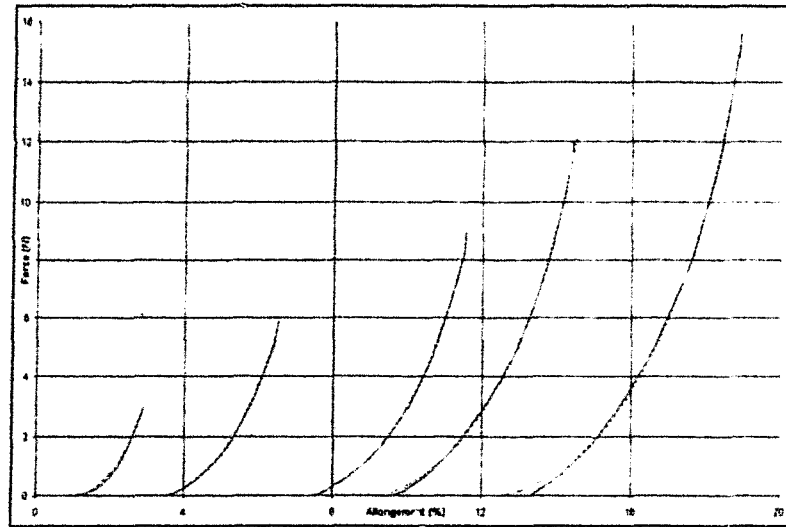


Figure IV-3-7 : Hystérésis du fil A1.

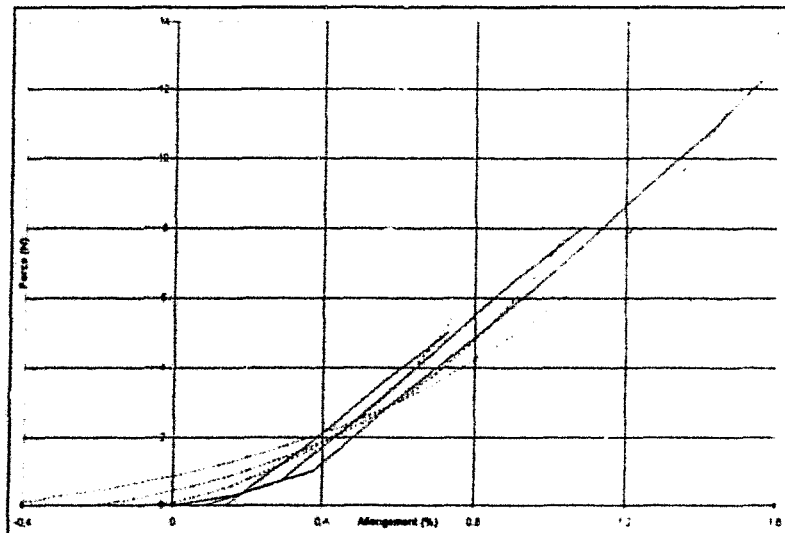


Figure IV-3-8 : Hystérésis du fil St.

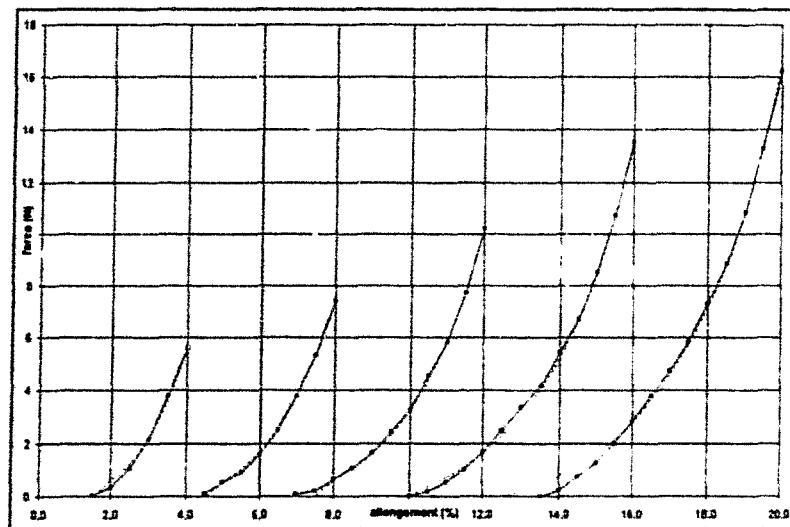


Figure IV-3-9 : Hystérésis du fil A2.

3.3. Comportement en flexion

Parallèlement aux études précédentes, les figures IV-3-10, IV-3-11, IV-3-12 représentent les tombés respectifs des fils *A1*, *St*, *A2*. En effet, l'essai expérimental proposé pour l'identification du coefficient linéaire de flexion C_f est le tombé de fil. S'il n'est pas proposé la superposition des deux tombés, c'est que la figure serait alors trop surchargée.

La convergence de l'algorithme d'identification, vers le minimum du coût choisi, garantit la bonne corrélation entre le tombé simulé et le tombé réel. La recherche pour un coût inférieur serait plus coûteuse en temps de calcul. La méthode de POWELL traduit, compte tenu de sa convergence, la dynamique globale du tombé et fournit un vecteur paramètre optimal par rapport au critère de convergence. Afin de garantir le découplage des paramètres, il a été étudié la sensibilité du critère de convergence par rapport au paramètres. [LEGR 00/1]

Le tableau suivant donne, pour chacun des trois fils, les valeurs du coefficient de flexion C_f identifié à l'aide des tombés des figures IV-3-10, IV-3-11, IV-3-12.

Fil	Coefficient de flexion
<i>A1</i>	$C_f = 7.2 \cdot 10^{-5}$
<i>St</i>	$C_f = 2.1 \cdot 10^{-1}$
<i>A2</i>	$C_f = 8.4 \cdot 10^{-5}$

Les deux fils *A1* et *A2* présentent des coefficients de flexion relativement proches. Ceci était prévisible de par la forme des deux fils prise à chaque étape de leur tombé. Seule la proximité de leurs titres explique celle de leurs coefficients de flexion. L'analyse du premier dépassement de la position d'équilibre montre, en effet, une sensibilité suffisante du modèle au paramètre titre.

L'apparente raideur en flexion du fil *St* sur la Figure IV-3-11, justifie la valeur du coefficient identifié.

En conclusion, l'observation fine du tombé d'un fil permet d'estimer la valeur du coefficient de flexion. Cette valeur est adoptée comme valeur initiale de l'algorithme d'identification.

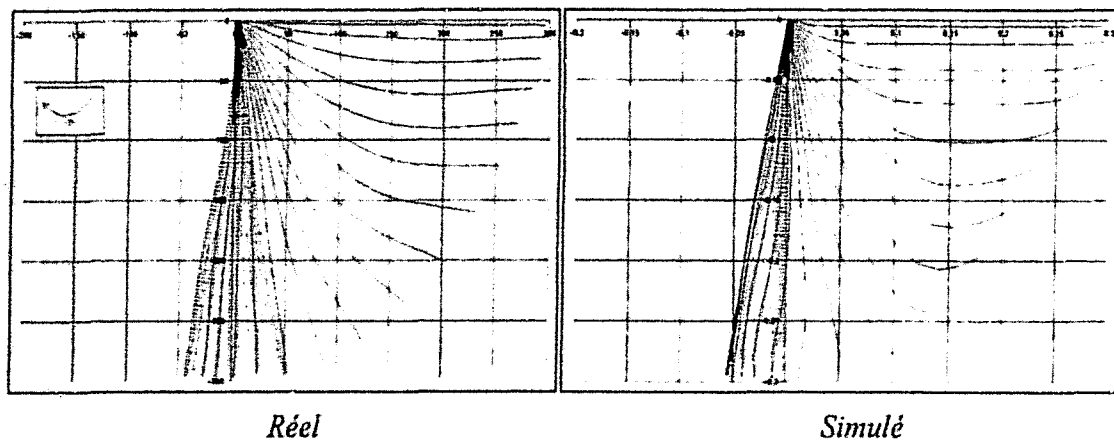


Figure IV-3-10 : Tombé du fil A1.

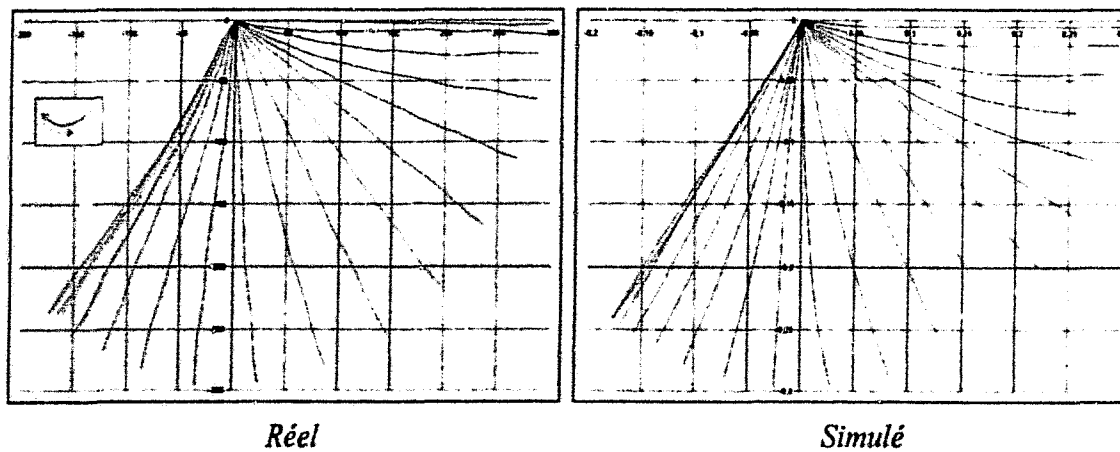


Figure IV-3-11 : Tombé du fil St.

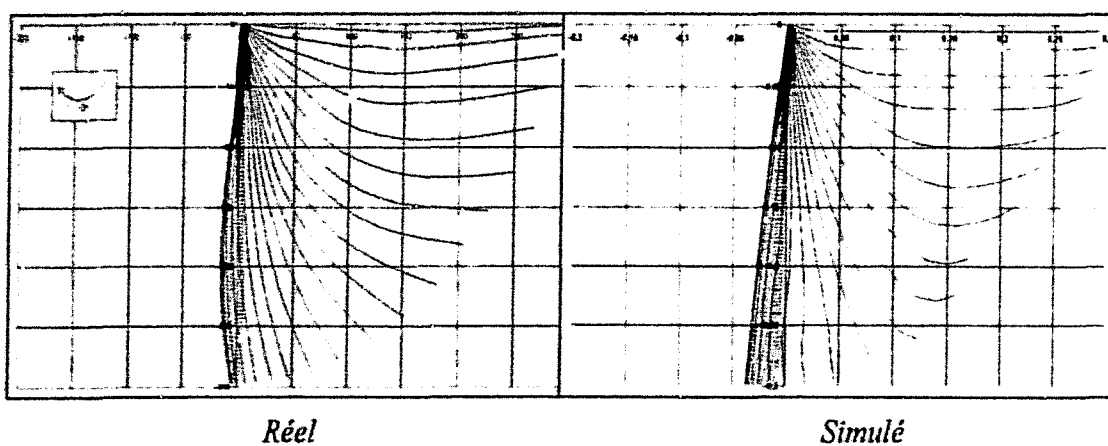


Figure IV-3-12 : Tombé du fil A2.

3.4. Comportement en propagation

Le test de propagation a été réalisé sur les 3 fils afin de déterminer pour chacun, la période t_e optimale. Pour cela, la vitesse de propagation de l'onde mécanique le long de chaque fil a été mesurée.

Fil	Vitesse de propagation	Période optimale t_e
<i>A1</i>	$v=1747.84m/s.$	$t_e = \frac{l_0}{17478.4}$
<i>St</i>	$v=2542.37m/s$	$t_e = \frac{l_0}{25423.7}$
<i>A2</i>	$v=1835.27m/s$	$t_e = \frac{l_0}{18352.7}$

Les résultats de cette étude sont récapitulés dans le tableau précédent. Celui-ci, donne pour chaque fil, la vitesse de propagation mesurée et la période d'échantillonnage t_e fonction de la longueur de la barre.

4. Résultat de simulation et comparaison aux tests réels en traction mono axiale

4.1. Présentation des tissus étudiés

Dans un premier temps, la validation du modèle a conduit à choisir deux domaines d'application techniques que sont l'habillage de sièges automobiles et les stores de grande taille.

Le tissu choisi pour représenter le secteur automobile (Figure IV-4-1) a été gracieusement offert par la société *DELCAR*, Société spécialisée dans la fabrication de textiles destinés à l'habillage intérieur des véhicules de l'industrie automobile et à l'habillage de sièges techniques (salle de cinéma, bureau, SNCF ...). Ce tissu est utilisé pour la confection de certains sièges de modèles Peugeot. Il est baptisé *tissu A1* et est constitué en chaîne comme en trame du fil *A1* précédemment étudié. Son armure est de type toile [Annexe].

Le tissu pour Store (Figure IV-4-2) est fourni par la société *HEXCEL FABRICS*. Il est d'armure *Cannelé 2-2*, armure dérivée de l'armure toile [Annexe]. La chaîne et la trame sont réalisés avec le fil *St*, un fil de Silionne enduit PVC. Il est noté *tissu St*.

Il est important de souligner que les armures toile et cannelée 2-2 sont toutes les deux des armures symétriques. Aussi, dans un but de montrer la sensibilité du modèle de tissu proposé à la texture du tissu étudié, un second tissu automobile a été choisi. Celui-ci comporte une armure asymétrique : l'armure sergé de 3 [Annexe]. Il est noté *tissu A2* (Figure IV-4-3), car il est constitué en chaîne et en trame du fil *A2*. Il habille les sièges de la *Ford Mondéo*.



Figure IV-4-1 : Tissu A1

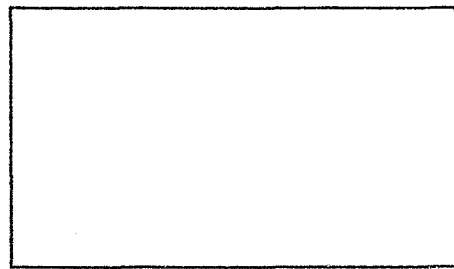


Figure IV-4-2 : Tissu St

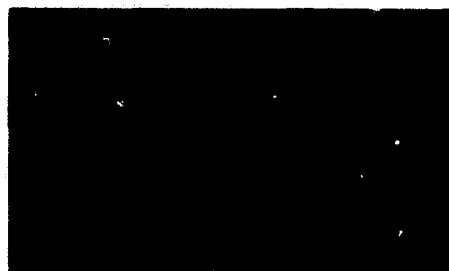


Figure IV-4-3 : Tissu A2

4.2. Conditions initiales de simulation et du test réel

Le modèle a été validé par des tests de traction simple à vitesse constante. Ceci permet de simplifier le modèle de fil utilisé en excluant le comportement en hystérésis (cf. § IV-3-2-3).

Le tissu testé est maintenu entre les deux mâchoires du 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 arrêté à $10 \text{ mm} / \text{min}$. Les dimensions des éprouvettes sont, pour les tests réels comme pour les tests simulés, conformes à la Norme NF [AFNO 75]. Elles sont de 200 mm en longueur et de 50 mm en largeur.

4.3. Tissu de siège automobile A1 : armure toile

La figure IV-4-4 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 rendre compte de la réalité. Ceci peut s'expliquer par le fait que la pré-tension du fil présente dans le tissu réel, ne peut pas être facilement mesurée et donc ne peut pas être prise en compte dans la simulation. D'autre part, le choix du seuil définissant l'équilibre dynamique est délicate et mériterait une étude plus approfondie. Actuellement, ce choix réalise un compromis entre la minimisation du temps de calcul et la qualité de l'équilibre dynamique.

De 3 % à 11% d'allongement, le modèle traduit bien la réalité, même si comme précédemment, un seuil plus faible concernant le critère d'équilibre dynamique pourrait garantir une meilleure approximation au prix d'un temps de calcul décuplé.

Au dessus de 11% d'allongement, le modèle ne tenant pas compte des phénomènes de frottement / glissement, il se produit une accumulation d'erreur, ce qui se traduit par un écart important lors de la rupture réelle du fil. Dans tous les cas, le matériau au dessus de 11% est sans aucun doute déjà sorti de sa plage commune d'utilisation.

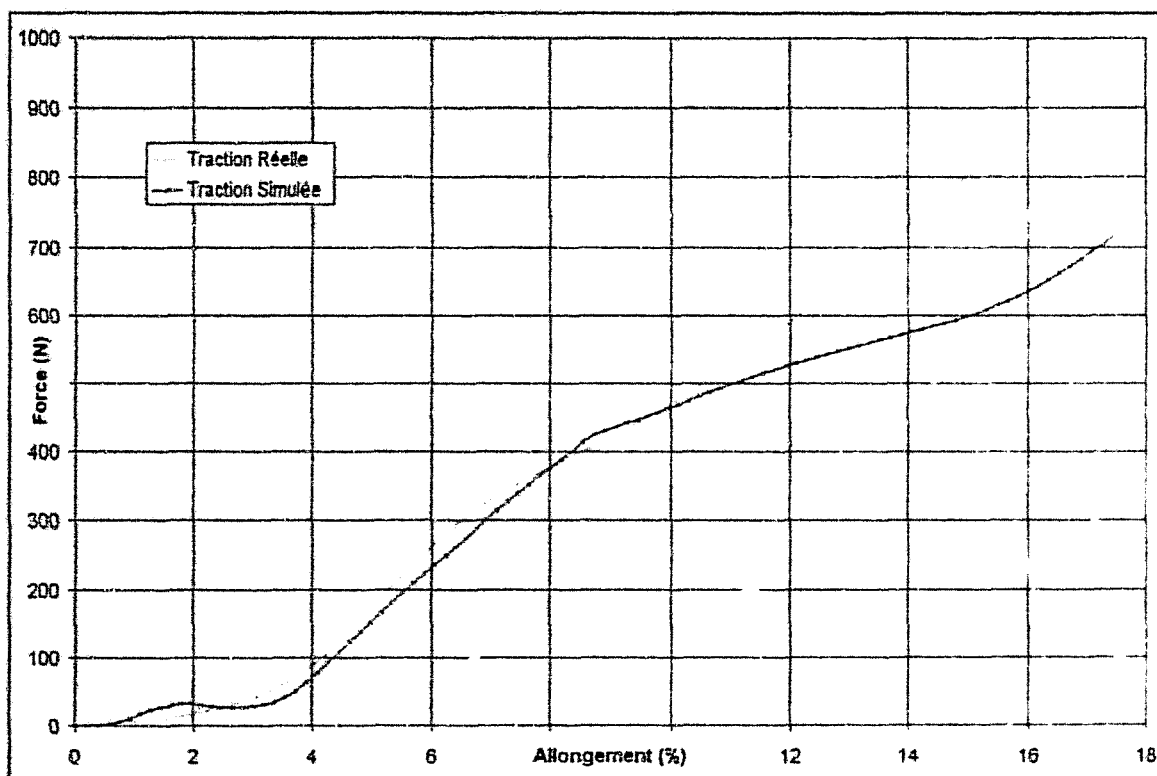


Figure IV-4-4 : Traction du Tissu A1

4.4. Tissu de store : 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.

La comparaison des courbes de traction réelle et de traction simulée du tissu *St* est donnée Figure IV-4-5. 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 sur la figure.

De 2% à 4,5% le modèle est fidèle à la réalité.

Au delà, jusqu'à la rupture, les fils dans la structure simulée se mettent à pivoter au niveau de chaque point de croisure, alors que ce phénomène n'est pas observable lors des tests réels où la chaîne reste perpendiculaire à la trame compte tenue de l'enduction. La courbe réelle comme l'observation des échantillons testés montrent que le tissu rompt avant qu'il y ait rupture de l'enduction. Ceci explique l'écart entre la simulation et les tests réels.

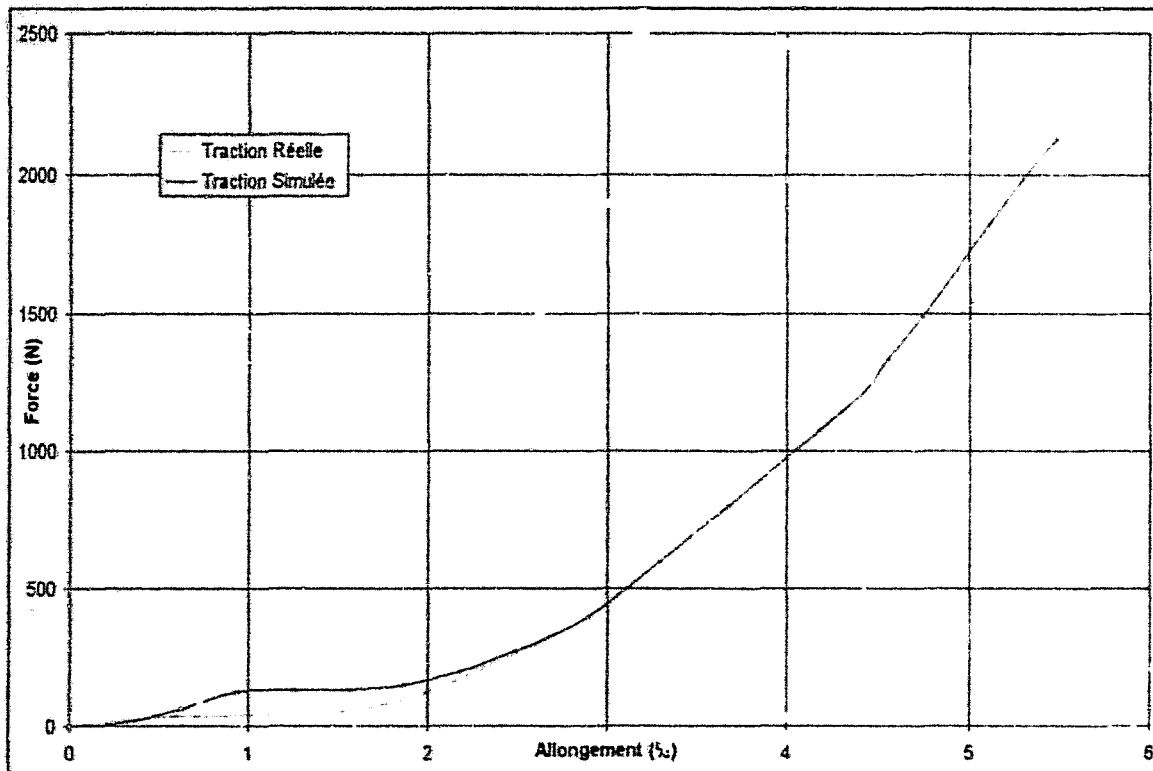


Figure IV-4-5 : Traction du Tissu *St*

4.5. Fil de siège automobile A2 : armure sergé de 3

Afin de montrer la capacité de l'algorithme à simuler au mieux le modèle, un seuil plus faible a été choisi pour caractériser l'équilibre dynamique de ce dernier tissu. Il en résulte une meilleure précision de simulation, mais en contrepartie un temps de calcul fortement augmenté. La figure IV-4-6 compare la courbe de traction réelle à la courbe de traction simulée pour le tissu A2.

Contrairement aux tests précédents, il n'apparaît que deux zones sur cette figure. En effet, il semble que la pré-tension des fils dans le tissu soit quasi identique à celle considérée lors des tests du fil seul.

L'analyse montre que jusqu'à environ 14 % d'allongement le modèle traduit bien la réalité. En effet, on peut supposer que jusqu'à cette valeur d'allongement, seuls les comportements en traction et en flexion des fils sont mis en jeu. Au delà, les phénomènes de frottement / glissement, non pris en compte par le modèle, interviennent et induisent une erreur importante. Ceci montre l'importance qu'il faut attacher à définir au mieux chaque comportement du fil. Une petite perturbation au niveau du nœud élémentaire engendre une erreur cumulée au niveau de la structure tissu.

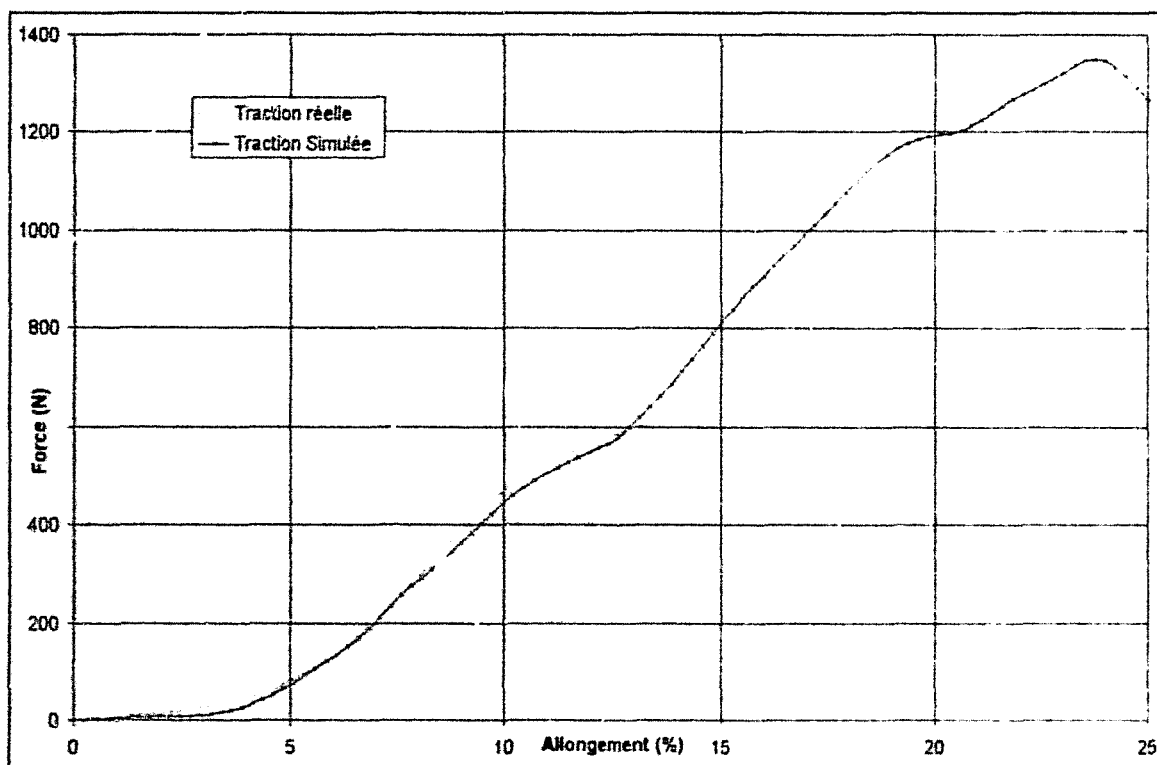


Figure IV-4-6 : Traction du Tissu A2

5. Résultats complémentaires

5.1. Déchirure en traction

Dans ce qui précède, afin de gagner du temps de calcul, les tests simulés sont effectués avec les allongements de rupture mesurés lors des tests réels de traction tissu. Des tests complémentaires, plus longs, ont montré la possibilité de détecter directement la rupture lors de la simulation. Pour cela, une instruction de test conditionnel est ajoutée dans l'algorithme. Elle compare, à chaque période T_e , l'allongement de chaque barre à l'allongement de rupture du fil auquel appartient cette barre. Cela permet alors de détecter la rupture du fil. Toutefois, dans le modèle, le fil de chaîne (respectivement trame) n'est pas autorisé à translater par rapport au fil trame (respectivement chaîne) au niveau des ponts de croisure (frottement / glissement). C'est la raison pour laquelle certains fils se sectionnent à plusieurs endroits lors de la simulation. Cela ne traduit pas la réalité. En fait, les fils ne présentent pas une parfaite homogénéité linéique et comportent des points faibles. Ceci explique qu'ils peuvent se rompre à un endroit difficilement prévisible. Pourtant, cette piste semble le moyen le plus simple et le plus rapide de mettre en œuvre la détection de la rupture.

La Figure IV- 5-1 donne un exemple de déchirure sur la traction du tissu A2.

La rupture dans le fil se traduit pour un nœud par une perte de connexité avec l'un de ses voisins. Il en résulte que sa précédente prédiction de déplacement n'est plus valide, et que l'estimation de son déplacement n'est plus possible. Le nœud passe alors d'un régime forcé à un régime libre au sens de l'automaticien. Cela entraîne la nécessité de calculer l'évolution de ce nœud sur un nombre de périodes t_e beaucoup plus élevé. Ceci se répercute sur l'ensemble de la structure. La partie sectionnée adopte alors un comportement plus proche du drapé et le la recherche de forme. Le temps de calcul devient prohibitif. C'est la raison pour laquelle, la déchirure n'a pas été poursuivie au delà de sa détection, dans l'exemple de la Figure IV-5-1.

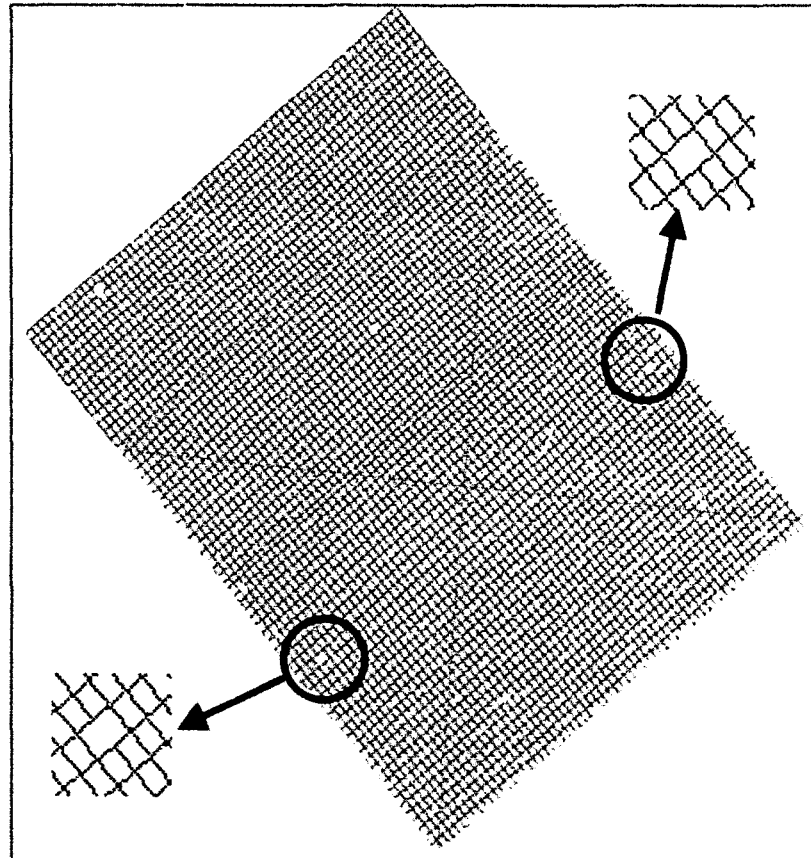


Figure IV-5-1 : Déchirure en traction du Tissue A2

5.2. Test de poinçonnement

Il est apparu intéressant de simuler un test de poinçonnement. En effet, celui-ci met en jeu une contrainte perpendiculaire à la surface du tissu contrairement au test de traction. C'est un moyen de montrer que le modèle travaille dans un espace à trois dimensions.

L'exemple de simulation de tests proposé a été réalisé sur le tissu A1. L'échantillon de forme carré, de 54mm de côté, est fixé sur ses quatre cotés. Le nœud central est déplacé à une vitesse $V=10\text{mm/min}$, perpendiculaire à sa surface. On peut cependant remarquer que cette simulation de test ne traduit pas complètement un test réel de poinçonnement. Dans la réalité, il est, en effet, impossible de ne solliciter qu'un nœud à l'aide du poinçon. C'est pourquoi, il n'est présenté ici que le résultat graphique de la simulation, la comparaison entre la courbe force – déplacement simulée et la courbe d'un test réel étant impossible.

La Figure IV-5-2 montre différentes étapes de la déformation du tissu sous sollicitation perpendiculaire à sa surface. On peut constater que la simulation est représentative de la réalité dans la mesure où les "mailles" proches du point de sollicitation sont plus déformées que les autres.

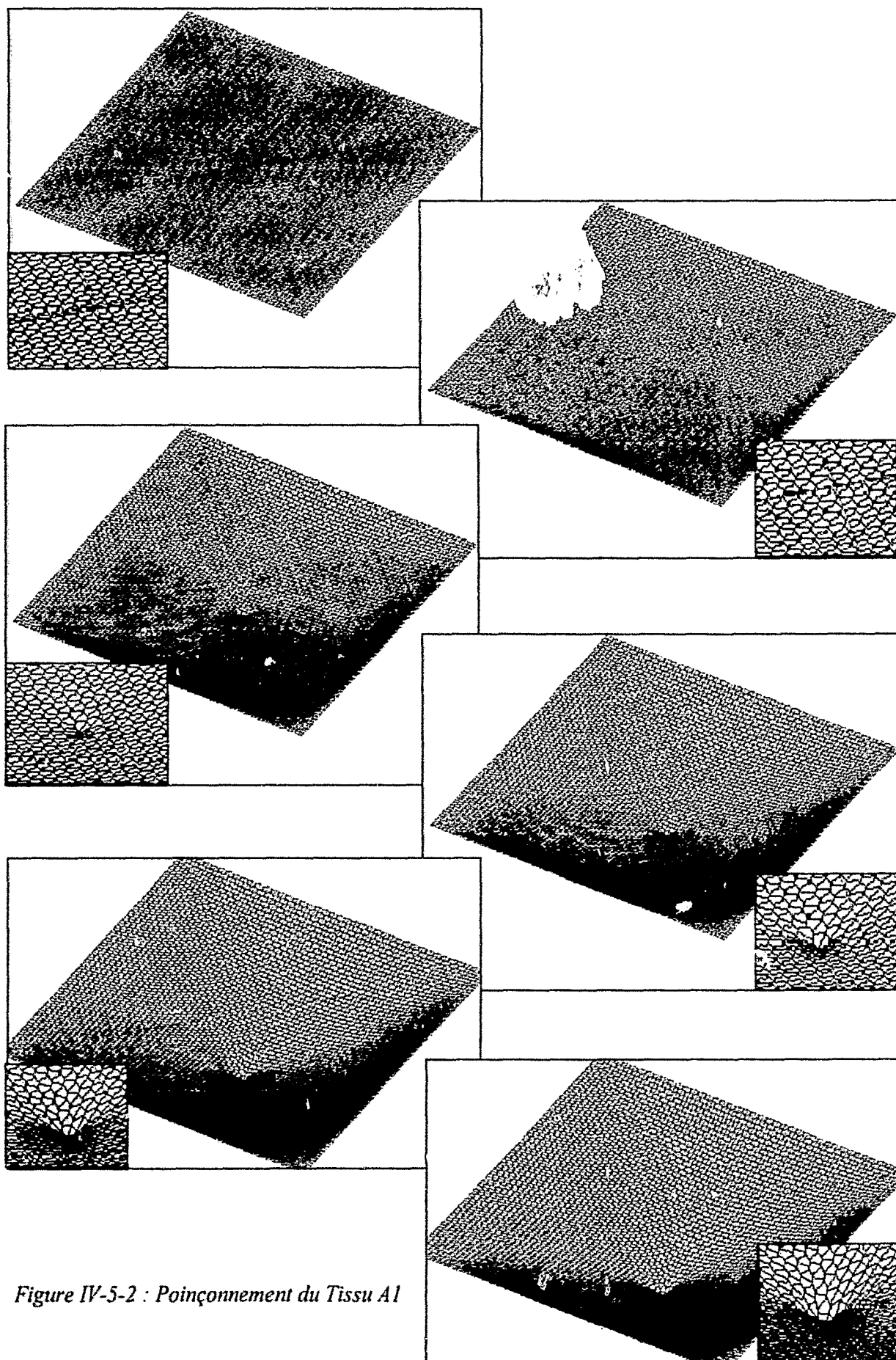


Figure IV-5-2 : Poinçonnement du Tissu A1

6. Conclusion

Ce chapitre a permis de valider le modèle fil et le modèle tissu en les confrontant aux résultats de tests réels.

Pour le modèle fil, l'adéquation entre les choix réalisés de modélisation et les comportements réels des fils étudiés est avérée. Ces choix se voient validés par la qualité des comparaisons possibles entre un test de traction réel et un test de traction simulé sur tissu.

Pour le modèle tissu, l'approche adoptée est prometteuse. Ainsi, ce modèle répond à l'objectif fixé. Il autorise le test d'un tissu non encore fabriqué à partir des propriétés des fils le composant. Il permet, de plus, la simulation en trois dimensions des déformations de tissus techniques comme le montre le test de poinçonnement. Enfin, un aménagement de l'algorithme autorise la détection de la rupture.

Cependant, cette étape de validation a permis de mettre en exergue les lacunes du modèle tissu et par conséquent du modèle fil. Ceci conduit à l'observation suivantes :

- Une erreur au niveau du nœud élémentaire engendre une erreur importante au niveau de la structure du tissu. Il se produit ce que l'on peut appeler un phénomène d'accumulation d'erreurs voire même un phénomène chaotique.
- Le seuil définissant l'état d'équilibre dynamique de la structure est apparu comme étant un critère important. Il doit permettre de réaliser un compromis entre la précision et le temps de calcul. Cet aspect mérite d'être développé.
- Le comportement en glissement du fil en contact avec un autre fil doit être étudié et l'effet de l'enduction doit, lui aussi, être considéré.
- Il est nécessaire d'envisager de tenir compte de la pré-tension éventuelle des fils dans la structure tissu. Bien que difficile à appréhender, l'examen de cette pré-tension devrait permettre d'étendre le modèle à des applications concernant le textile traditionnel (drapé).

Pourtant, il semble que pour la plage d'utilisation normale de ces 3 tissus, le modèle traduit correctement la réalité.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le modèle mathématique exposé dans cette étude s'inscrit dans le cadre d'une nouvelle génération de modèle. En effet, de nombreux chercheurs travaillant sur le sujet propose des modèles de tissu de type surfacique. Nombreux sont ceux qui utilisent la méthode des éléments finis et un élément coque. Ils simulent le tissu à partir des propriétés mécaniques du tissu. Pour cela, ils font différents tests de traction en chaîne et en trame mais aussi en hors axe. De nombreux modèles considèrent le tissu comme une surface isotrope ou orthotrope. Cette approche a l'avantage de caractériser le tissu avec un nombre peu important de paramètres et de conduire à des temps de calcul, pour la simulation, relativement faibles. En contrepartie, la création de la base de données des paramètres du modèle pose un gros problème. Celle-ci est complétée d'un nouvel élément dès la moindre modification sur la conception du tissu, comme le changement de l'armure, les modifications des paramètres de tissage, le changement de fil de chaîne ou de trame...

L'approche proposée est très différente. Définir le modèle de fil et l'intégrer dans un modèle de tissu sont innovants, car tout en restant au stade du tissu, nous nous plaçons par le fil au plus près du matériau textile. Ainsi, cette approche résout non seulement les problèmes évoqués précédemment, mais peut conduire aussi à la fabrication virtuelle de tissus dans un proche avenir. Elle réalise le changement d'échelle : le passage de l'échelle fil à l'échelle tissu. L'objectif du chapitre I a été de présenter l'état de l'art sur le sujet. La recherche bibliographique remonte très loin dans le temps. Les premiers travaux sont d'une grande importance car ils traitent en détail de la modélisation géométrique du fil. Les moyens informatiques de l'époque, quasi inexistantes voire inexistantes, ont sans aucun doute freiné fortement ces travaux et n'ont pas permis la validation des modèles proposés. Plus récemment, l'essor des techniques de calcul telles que la méthode des éléments finis a orienté la modélisation des tissus vers des modèles surfaciques. Il semble, en effet, naturel de considérer un panneau de tissu comme une surface. Depuis peu, on peut remarquer que certains chercheurs se sont à nouveau intéressés au fil et à sa modélisation. Ce chapitre, retraçant ce parcours scientifique, permet de se situer au mieux pour le développement d'un modèle de tissu tridimensionnel. Il justifie le choix qui a été fait de l'imbrication d'un modèle de fil dans le modèle tissu.

Le chapitre II a été axé sur la présentation du modèle du fil et du modèle de tissu. Il a montré l'intérêt d'un changement d'échelle du fil au tissu. Tenir compte des caractéristiques du fil, des données de tissage, ... a peut être augmenté le nombre de paramètres pour décrire les caractéristiques du tissu, mais cela a permis de réduire fortement la base de données tissu. Cependant, cela entraîne la création d'une base de données fil. Un fil pouvant être constitutif de tissus d'armures et/ou de données de tissage diverses, il est possible de simuler de nombreux tissus uniquement à partir des caractéristiques du fil. Le modèle de tissu a été considéré comme un ensemble de points de croisure associés les uns aux autres. Cette structure présente un grand intérêt pour la continuité de l'étude. En effet, le tissu est alors considéré comme un système global défini par un ensemble de sous systèmes interconnectés. Etant donné que le modèle doit évoluer et tenir compte de nouveaux comportements, la structure du modèle se doit d'être adaptative. Il suffit alors de modifier le sous système appelé nœud pour appliquer la modification à l'ensemble de la structure tissu.

Le chapitre III a permis de définir une stratégie d'identification des paramètres du modèle de fil. Leur diversité et leur importance a nécessité de les classer suivant des critères d'affinité. Il aurait été possible d'utiliser des schémas de classification tels que ceux proposés par LAURENT [LAUR 85]. Le choix s'est porté sur une méthode de classement prenant en compte le comportement mécanique du tissu. Cette stratégie a conduit à définir les tests en fonction du comportement étudié et en s'efforçant de minimiser l'influence des autres comportements. Ainsi, différents types d'essais relatifs à différents comportements mécaniques ont été présentés et utilisés pour identifier les paramètres inconnus du modèle de fil. La classification a permis d'éviter les effets néfastes dus à la compensation paramétrique. D'ailleurs, une étude sur la sensibilité des paramètres a montré, pour le comportement en flexion, que l'essai de tombé permet de bien caractériser le comportement souhaité [LEGR 00/3]. Dans ce chapitre, sont présentées également les méthodes d'identification des paramètres associés à la classification. Une nouvelle technique combinant la vision artificielle et une identification par la méthode du modèle a été présentée. Son intérêt est son application possible à d'autres tests relatifs au tissu comme la drapabilité et le drapage du tissu, très délicats à appréhender autrement.

Le chapitre IV est consacré à la validation du modèle mathématique du fil et aux résultats de l'identification associée à ce modèle. La superposition des courbes simulées et des courbes réelles, en fonction des comportements dynamiques choisis, a montré que l'ensemble de ces comportements mécaniques était sans aucun doute intégré dans le modèle de fil. La

classification des paramètres a fortement rationalisé l'étude. L'analyse des résultats s'est trouvée simplifiée et a conduit à des conclusions objectives pour les différents fils étudiés.

La validation du modèle de tissu a ensuite été effectuée. Cette validation s'est révélée plus difficile que celle du modèle de fil. La comparaison des courbes de traction réelles et simulées de tissu a montré quelques imperfections qu'il sera nécessaire de corriger.

Dans ces conditions, les perspectives proches sont d'intégrer, dans un premier temps, le phénomène de frottement / glissement entre les fils de chaîne et les fils de trame. Un dispositif expérimental mesurant l'angle du cône d'adhérence d'un fil sur un autre fil est d'ores et déjà à l'étude.

Un problème subsiste dans la simulation, le souhait d'aller très loin dans la modélisation engendre des temps de calcul importants malgré les techniques implantées dans l'algorithme pour les réduire. Aussi, il est actuellement envisager d'utiliser des techniques informatiques modernes telles que le clustering. En effet, le caractère fortement parallèle du modèle permet d'envisager un gain substantiel de temps de calcul.

Dans le cas de l'identification du coefficient de flexion lors du tombé du fil, il est possible d'utiliser, là encore, un cluster. De plus, l'étude d'un comportement du fil en flambage devrait permettre d'éviter les très coûteuses simulations de tombé de fil, réduisant alors le temps de calcul. Il serait aussi possible d'affiner le comportement en flexion du fil en étudiant, par exemple, l'influence de la vitesse sur ce comportement. Pour cela, le dispositif expérimental sera similaire à celui utilisé pour le comportement en traction.

Une étude plus poussée sur la méthode d'intégration de l'équation différentielle régissant le mouvement du nœud élémentaire doit être menée. Elle devrait permettre d'accélérer la convergence de l'algorithme, et ainsi de diminuer le temps de calcul.

Il serait aussi nécessaire de développer un algorithme de gestion des collisions en se basant par exemple sur les travaux de Provot [PROV 97]. Ainsi, il serait possible de simuler les tests de poinçonnement.

Toutes ces améliorations permettront, dans un proche avenir, d'atteindre l'objectif que s'est fixée notre équipe : proposer un logiciel de CAO TuT, logiciel d'aide à l'architecture TuT.

Bibliographie

Bibliographie

- [ABBO 73] ABOTT G.M. , P. GROSBERG, G.A.V. LEAF The Elastic Resistance to Bending of Plain-woven Fabrics Journal of Textile Institute p 346 N°6 1973
- [AFNO 75] AFNOR, recueil de normes françaises, Textiles terminologie et méthodes d'essais, tome 1 et tome 2, 1975.
- [AFNO 88] AFNOR, recueil de normes françaises, Textiles, tome 3, fibres et fils, essais, 1988.
- [BLAN 94] BLANC Carole Techniques de modélisation et de déformation de surfaces pour la synthèse d'images. (Surface modelling and deformation technics for computer graphics) Université de Bordeaux 1, Talence Thèse déc-94
- [BLAN 95] BLANLOT Roger ; Modélisation de la mise en forme de tissus préimprégnés non polymérisés : Application au drapage ; ENSAM ; Thèse ; 1995
- [BOIS 95] BOISSE P; CHEROUAT A; GELIN JC; SABHI H; STOKES VIJAK K Experimental study and finite element simulation of a glass fiber fabric shaping process. Mechanics of plastic composites Polymer composites 1995; VOL. 16; NO. 1; PP. 83-95; Use of plastics and plastic composites: materials and mechanics issues. Symposium/USA/1993; 12 ;
- [BONN 95] BONNET Pierre ; Cours de DEA : traitement d'images ; USTL; 1995
- [BREE 94] BREEN, D.E., HOUSE, D.H., and WOZNY, M.J., Predicting the drape of woven cloth using interacting particules, Computer graphics proceedings, (Proc. SIGGRAPH 94), p 365-372, vol . 28, 1994.
- [BRUN 88] BRUNIAUX P., Contribution à la modélisation non linéaire, à l'identification et à la commande en boucle ouverte des moteurs pas à pas hybrides. ; Thèse ; USTL Flandres Artois, Décembre 1988
- [CHER 94] CHEROUAT A, Simulation numérique du préformage des tissus de fibre de verre par la méthode des Eléments Finis, Thèse de l'Université de Franche Comté, 1994
- [CHER 95] CHEROUAT A, GELIN JA, SABHI H, Modélisation de l'emboutissage des tissus de fibre de verre par la méthode des Eléments Finis, Revue des Eléments Finis n°5, 1995

- [CHER 00] CHEROUAT A, BILLOET JL, Finite Element Model for Simulation of Preimpregnated Woven Fabric by Deep-Drawing and Laying-Up Processes, Journal of Advanced Materials, Octobre 2000, Volume 32, N° 4
- [FERR 96] FERREIRA Manuela, Etude des fibres et câbles haute performance en poly(p-phénylène -co-3,4' - oxydiphénylène téréphtalamide) (Technora) : Relation structure-comportement mécanique et recherche de critères de dépose des câbles. ; Université des Sciences et Technologies de Lille I ; octobre 1996
- [FRAN] FRANCOIS D, PINEAU A, ZAOUI A, ; Comportement mécanique des matériaux ; Hermes
- [FRAN 94] FRANCESCATO Pascal ; Préviation du comportement plastique des matériaux hétérogènes à constituants métalliques. Application aux composites à matrice métallique à fibres continues et aux plaques perforées ; Thèse ; septembre 1994 ; Université de Grenoble 1, Saint-Martin-d'Hères
- [GHIT 97/1] GHITH, P.BRUNIAUX, and C.VASSEUR ; Modelling a fabric dynamics ; XIth Romania Conference of Textiles and leathership ; October 1997 ; Iasi, Romania.
- [GHIT 97/2] GHITH A., BRUNIAUX P., KONCAR V., VASSEUR C., ; Modeling and Simulation of a Falling Yarn with One End Fixed ; Textile Research Journal ; pp 321-324 ,N° 67,N° 5, May 1997
- [GHIT 98/3] GHITH, P.BRUNIAUX, and C.VASSEUR, Deformable model Theory applied to fabrics, IEEE-IMACS, CESA'98, April 1998, Nabeul-Hammamet, Tunisie.
- [GROS 66] 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
- [HAAS 12] HAAS R ; Rep ANNU National Advisory Committee for Aeronautics ; 1912
- [HAMI 64] Hamilton J B ; A general system of Woven Fabric Geometry ; Journal of Textile Institute ; 1964, 5 5 T66-T82.
- [JIMI 91] JI Michel ; Modélisation du comportement mécanique des géoTextiles. (The modelization of the mechanical behaviour of geoTextiles) ; Université de Haute Alsace ; Thèse ; septembre 1991
- [KACE 00] KACEM Imed ; Contribution à la modélisation des Structures Textiles Enduites ; Mémoire de DEA ; USTLille ; 2000
- [KASD 94] KASDI Abdellah ; Détermination des paramètres des modèles élastoplastiques à partir de l'essai pressiométrique ; Université des Sciences et Technologies de Lille I ; Thèse ; Novembre 1994 ; 127 p
- [KAWA 73] KAWABATA S., M. NIWA, H. KWAJ , The Finite-deformation Theory of Plain-Weave (part I, II, III), Journal of Textile Institute, N°2 & N°64, 1973.

- [KEMP 58] KEMP A. ; An extension of Pierce's cloth geometry to the treatment of noncircular threads ; Letters to the éditeur ; Journal of Textile Institute , 1963 ; 54 ; T9-T27
- [KILG 96] KILGARD Mark ; The OpenGL Utility Toolkit (GLUT) : Programming Interface – API version 3 ; Silicon Graphics Inc. ; 1996
- [LAUR 85] LAURENT Robert ; Modélisation et identification des systèmes complexes, application à l'épuration biologique des eaux ; Thèse d'état USTLille 1958
- [LEAF 64] LEAF G.A.V ; A generalized model of plain woven fabric ; Journal of Textile Institute ; p431 ; N°55 ; 1964
- [LEGR 96] LEGRAND X., Cours de Vision Artificielle & traitement d'images ; ENIMonastir (Tunisie) ; 1995
- [LEGR 00/1] LEGRAND X., BRUNIAUX P., VASSEUR C, Modeling and Study of Yarn Dynamic Behavior, Textile Research Journal, A paraître en 2001.
- [LEGR 00/2] LEGRAND X., Bruniaux P., A new approach for modeling woven fabrics. WAC2000, Fourth biannual world automation congress, Wailea, Maui, Hawaii, USA, June 11-16, 2000.
- [LEGR 00/3] LEGRAND X., Bruniaux P., Modeling and Study of the Dynamical Behavior of a Yarn, IMACS 2000, Lausanne Suisse, août 2000
- [LENE 84] LENE F, Contribution à l'étude des matériaux composites et de leur endommagement, Thèse d'état – Paris VI, 1984
- [LUCA 76] LUCAS Edouard ; Sur la géométrie du tissage ; CR de l'association française pour l'avancement des sciences du 28 août 1978
- [MADR 95] MADROLLE François, Etude du comportement mécanique des matériaux Textiles soumis à des sollicitations rapides ; Université de Haute Alsace, Thèse; 1995
- [MACK 56] MACK & TAYLOR ; The fitting of woven cloth to surfaces, Journal of Textile Industry, n°47, P. 477-488, 1956
- [MAGN] MAGNENAT THALMANN Nadia , Stephane Carion, Martin Courchesne, Pascal Volino & Yin Wu, Virtual clothes, hair and skin for beautiful top models, computer Graphics International'96 Proc., pp132-141, Poang, Korea, juin 1996
- [NGNU 93] NGUYEN Thanh Quang , Contribution à l'étude du comportement mécanique des tissus techniques enduits. (Contribution to study the mechanic behaviour of the coated fabrics), Institut National Polytechnique Grenoble ; Thèse ; Décembre 1993 ; 207 p
- [OLOF 64] OLOFSSON B. A general model of fabric as a geometric mechanical structure. Journal of Textile Institute, p541, v°55, 1964.

- [OLOF 67] OLOFSSON B. ; A study of Inelastic Deformations of Textile Fabrics ; Journal of Textile Institute ; p221 ; N°6 ; 1967
- [PIER 30] PIERCE F.T. ; The Handle of Cloth as a measurable quantity ; Journal of Textile Institute ; p377 ; N°21 ; 1930
- [PEIR 37] PIERCE F.T. ; The geometry of cloth structure ; Journal of Textile Institute ; p45-96, v°28, 1937.
- [POST 81] POSTLE R ; The rheology of woven and knitted fabrics ; Textile Machinery Society of Japan ; 1981; Part 3 ; pp 1-19;
- [POWE 64] POWELL M. J. D. ; A method for minimizing a sum of squares of a non-linear functions without calculation derivatives ; Computer Journal ; Vol. 7 ; 1964
- [PROV 97] PROVOT Xavier ; Animation réaliste de vêtements , Thèse de l'Université René Descartes – Paris V ; 1995
- [RICH 71] RICHALET J., Rault A., Pouliquen R.; Identification des processus par la méthode du modèle. ; Gordon and Breach ; Théorie des systèmes ; n 4 ; 1971
- [SCHO 89] SCHOCK HAN J.; Some general remarks on the structural behaviour and load extension characteristics of coated fabrics with special reference to PTFEcoated glass fiber fabric ; Congres 1989 p21-29 1989
- [SINO 93] SINOIMERI Artan Contribution à l'étude du comportement mécanique des étoffes par méthodes énergétiques: cas de l'armure toile ; Université de Haute Alsace ; Thèse ; novembre 1993
- [SPAA 95] SPAAKM.L. ; Les Textiles techniques : une stratégie de diversification ; Technologies Internationales ; N°18 ; Octobre 1995
- [TCHE 78] TCHEBICHEF ; Sur la coupe des vêtements ; CR de l'association française pour l'avancement des sciences du 28 août 1978
- [WEIL 86] WEIL, J., "The synthesis of cloth objects", computer graphics proceedings (proc siggraph 86), p 49-54, vol. 20, n° 4, 1986.
- [WU 92] WU Yueming, Evaluation des caractéristiques physique des étoffes par méthodes classiques et KES: études de corrélations Université de Haute Alsace, Thèse, Mars 1992, 200p.

Annexes

Annexe : Lexique textile

Calandrage : Procédé mécanique de finissage des étoffes pour leur conférer un effet particulier. Au cours de cette opération, le tissu est passé entre deux rouleaux chauffés sous pression.

Retrait : Pourcentage de la différence de longueur d'un fil de trame dans le tissu et hors tissu.

Embuvement : Pourcentage de la différence de longueur d'un fil de chaîne dans le tissu et hors tissu.

Réduction : Nombre de fils au centimètre en chaîne ou en trame.

Chaîne : Ensemble de fil courant dans le sens de la longueur du tissu, parallèles à la lisière et qui entrecroisent avec les fils de trame.

Trame : Fil perpendiculaire à la chaîne, allant d'une lisière à l'autre. Chaque longueur transversale est appelée la duite.

Armure : Mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame.

Flotté : Portion d'un fil de chaîne ou de trame qui s'allonge par-dessus deux ou plusieurs duites ou fils de chaîne adjacents dans une armure.

Contexture : Nombre de brins ou de duites par unité de longueur dans un tissu et type d'armure.

Duite : Fil de trame unitaire déposé dans la foule par le vecteur d'insertion.

Foule : Chemin de passage à travers la chaîne formé par la levée d'une partie des fils de chaîne.

Annexe : Armures en tissage

1. La toile

La toile porte différents noms selon le lieu géographique. Ainsi, dans le Nord de la France on parle de *Toile*, dans la région lyonnaise, de *Taffetas*, dans les Vosges d'*Unis* ou bien encore dans la région de Vervier (Belgique) de *Drap*.

La toile n'a pas de flotté. Elle n'a pas non plus d'envers ou d'endroit. A montage égal, la toile est le tissu le plus solide donc le plus utilisé.

La toile s'obtient en levant tous les fils de chaîne pairs au passage de la duite (fil de trame), puis tous les fils impairs au passage de la duite suivante.

Représentation de la l'armure Toile :

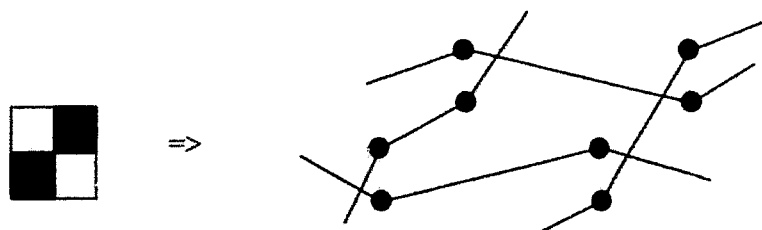


Figure A-1 : L'armure to

2. Le sergé

Le sergé est formé de flottés chaîne ou trame liés par un point, suivant un décochement de 1. Chaque duite passe successivement au-dessus de plusieurs fils et au-dessous d'un seul fil.

Cette armure présente des cotes saillantes séparées par des sillons formés par les points de liage. On parle alors de cordon. Les sergés ont un envers et un endroit.

Représentation de la l'armure Sergé de 3 :

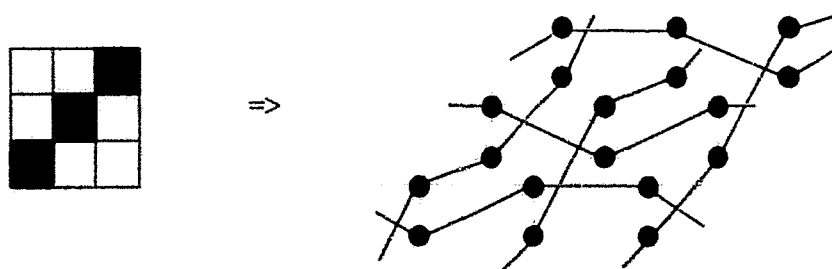


Figure A-2 : L'armure sergé de 3

3. Le cannelé

L'armure Cannelé est une armure dérivée de l'armure Toile. Il correspond à une armure toile dans laquelle la chaîne et la trame sont doublées.

Représentation de la l'armure Cannelé 2-2 :

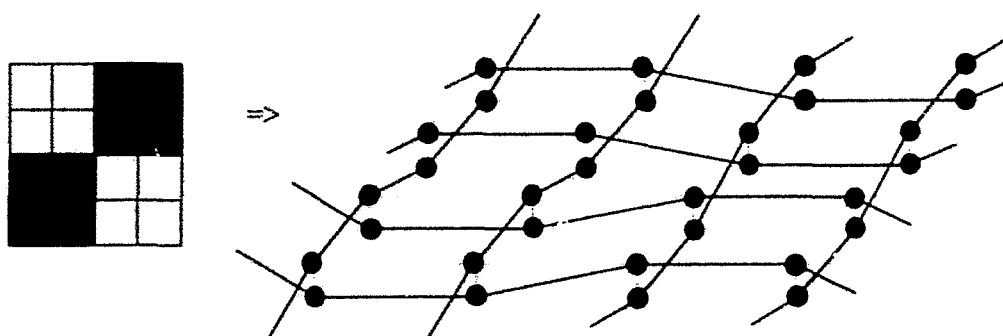


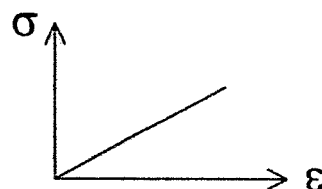
Figure A-3 : L'armure Cannelé 2-2

Annexe : Modèle viscoélastique

1. Comportement élastique

Un matériau élastique est considéré comme un milieu continu se comportant conformément à la loi de HOOKE. Après sollicitation, la décharge complète de celui-ci le ramène à l'état initial. Un tel matériau possède un seul état naturel qu'il retrouve lorsque toutes les forces appliquées sont nulles. Hormis le comportement en fatigue, cette propriété d'élasticité fait qu'il est indépendant de son histoire. Ce matériau suit donc la loi :

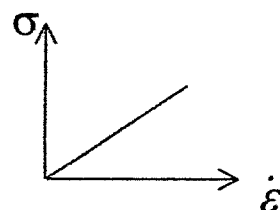
$$\sigma = E \varepsilon$$



2. Comportement visqueux

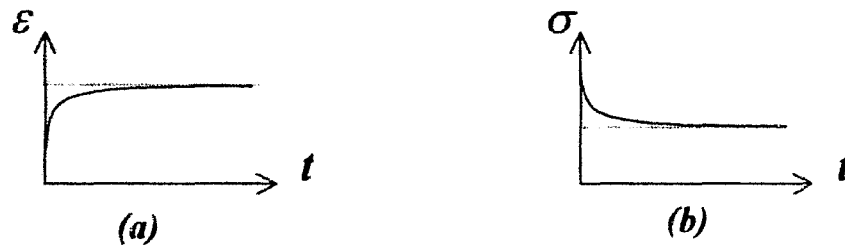
Un matériau visqueux est considéré comme un milieu continu se comportant conformément à la loi de NEWTON. La contrainte est proportionnelle à la vitesse de déformation et indépendante de la déformation :

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$$



3. Fluage et relaxation

Le fluage se définit par la variation de la déformation d'un système sous charge constante en fonction du temps. La relaxation se définit par la variation de la contrainte d'un système sous déformation constante en fonction du temps. Le fluage et la relaxation englobent donc toutes les déformations en fonction du temps.



Résultats de fluage (a), de relaxation (b)

4. Représentation rhéologique

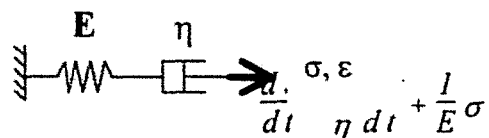
Ce type de modèle mécanique est constitué de ressorts et d'amortisseurs. Le ressort caractérise l'élasticité linéaire et l'amortisseur la viscosité newtonienne. Ce dernier permet de prendre en compte les effets de la vitesse de traction. [FRAN]

On définit tout d'abord :

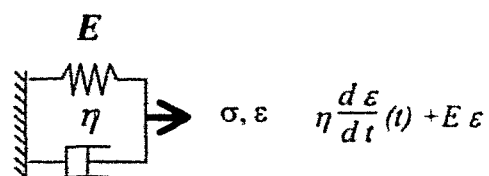
- σ : contrainte,
- ε : déformation,
- E : module d'élasticité,
- η : coefficient de viscosité.

Deux modèles élémentaires importants peuvent être cités :

- le modèle de Maxwell :



- le modèle de Kelvin :



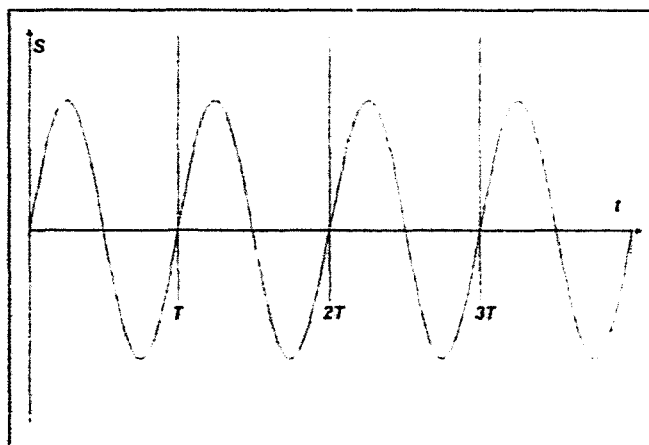
Annexe : Théorème de SHANNON

On se propose ici d'exposer succinctement le théorème de SHANNON. L'objet de ce théorème est d'exprimer les conditions dans lesquelles l'échantillonnage d'un signal représente correctement ce signal.

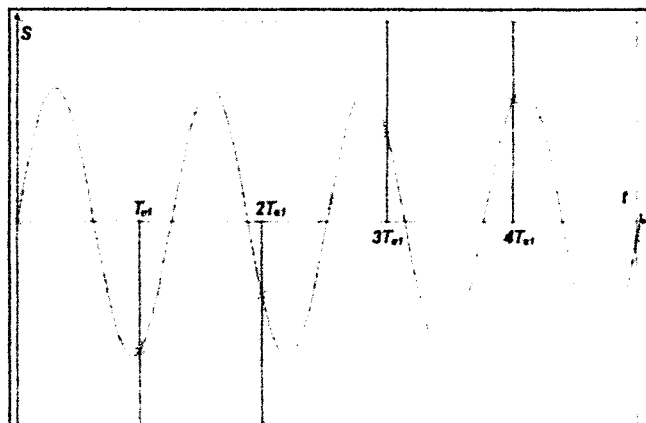
Énoncé du théorème de SHANNON :

Un signal qui ne contient pas de composantes à des fréquences supérieures ou égales à une valeur f_s est correctement échantillonné avec une période T_e telle que $T_e \leq \frac{1}{2f_s}$.

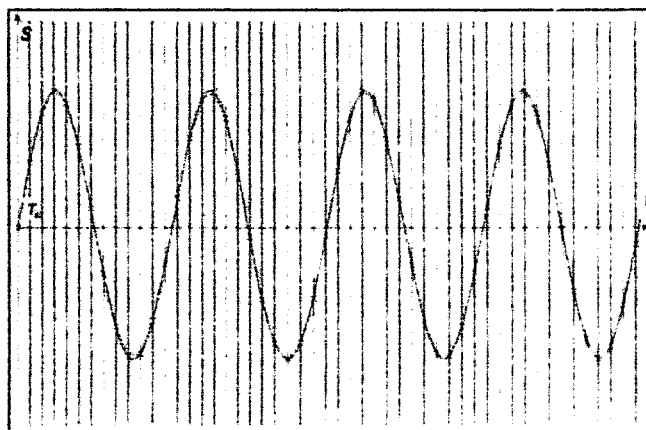
Ainsi, considérons le signal $S(t)$ de période propre T suivant :



Si ce signal est échantillonné avec une période T_e ($T_e > \frac{T}{2}$), on a :



Si ce signal est échantillonné avec une période T_{e2} ($T_{e2} < \frac{T}{2}$), on le représente correctement :



Dans ce cas, le théorème de SHANNON préconise de choisir une période T_e telle que $T_e \leq \frac{T}{2}$.