

Vers un outil C.A.O. pour la maille

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA)

(Spécialité Informatique)

par

Sylvia Piotin

Président : M. Sylvain MICHELIN Professeur, Université de Marne la Vallée

Rapporteurs : Mme. Dominique FAUDOT Professeure, Université de Bourgogne
M. Christophe RENAUD Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale

Examineurs : M. Jean-Marie BACHMANN Ingénieur, IFTH Troyes
M. Jean-Michel NOURRIT Maître de conférences, URCA (encadrant)

Directeur : M. Yannick REMION Maître de conférences, URCA



CRéSTIC



Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Introduction	1
I Analyse	5
1 État de l'art	6
1.1 La modélisation de textile	6
1.2 L'animation	8
1.3 Le rendu visuel	9
1.4 Le tricot au sein du laboratoire	10
1.4.1 La modélisation géométrique	10
1.4.2 Animation dynamique	11
1.4.2.1 Splines matérielles dynamiques	12
1.4.2.2 Application au tricot	12
1.4.2.3 Réduction de paramétrage	13
1.4.3 Visualisation	15
1.4.4 Conclusion	15
2 Techniques industrielles de tricotage	17
2.1 L'industrie de la maille : la bonneterie	17

2.2	Fabrication industrielle des tricots	19
2.3	Les fils	30
3	Le schéma de liage	33
3.1	Les conventions de représentation graphique des éléments de base d'un tricot	33
3.2	L'utilisation de la norme pour définir les liages de base	36
3.2.1	Les tricots à base jersey	36
3.2.2	Les tricots à base de côte 1 et 1	40
3.2.3	Les tricots avec suppression de colonnes de mailles	42
3.2.4	Les tricots à mailles chargées	45
3.2.5	Le « spacer 3D »	47
4	Formalisation du savoir-faire des tricoteurs	49
4.1	L'extraction de connaissances	49
4.2	La formalisation des savoirs et savoir-faire de nos partenaires de l'IFTH	51
II	Logiciel de prototypage virtuel	57
1	Introduction	58
1.1	Enjeux à long terme	58
1.2	Enjeux de la thèse	59
1.3	Présentation du logiciel	60
2	Le cœur : Modélisation topologique et géométrique à partir de données métier	62
2.1	Géométrie de la maille	63
2.1.1	Choix d'une modélisation basée fil	63
2.1.2	L'élément de base de notre modélisation : les BPs	63
2.2	Analyse du motif	66
2.2.1	Les règles de traitement du motif	66
2.2.2	Mise en place	75
2.3	Genèse de la topologie à partir des BPs	79
2.3.1	Modélisation d'un fil	79
2.3.2	Trajectoire des fils au sein du tricot	80

2.4	Les métacylindres	81
2.4.1	Interpénétration de fils	81
2.4.2	Création des métacylindres	83
3	L'application « Tricot 3D »	86
3.1	Architecture globale	86
3.2	L'interface Homme-Machine	90
3.3	Implémentation et résultats	92
	Conclusion	97
	Bibliographie	101

Table des figures

1.1	Construction d'une boucle	11
1.2	Modélisation des contraintes barycentriques pour assurer le contact entre les fils	13
1.3	Ressorts d'orientations permettant de prévenir les croisements de fils	14
2.1	Illustration des différences entre le tissage et le tricotage	18
2.2	Anatomie d'une maille	19
2.3	Les deux faces d'un tricot	20
2.4	Aiguille à clapet	21
2.5	Formation d'une maille	22
2.6	Les métiers rectilignes	22
2.7	Métier à tricoter rectiligne	23
2.8	Vue du dessus d'un métier à tricoter rectiligne à 2 fontures où l'on a tricoté uniquement sur la fonture arrière	23
2.9	Juxtaposition d'aiguilles placées en opposition	24
2.10	Maille chargée	24
2.11	Cycle de formation d'une maille chargée	25
2.12	Influence d'une charge dans un jersey endroit	26
2.13	Tricot côte 1 et 1 tramé	26
2.14	Principe de fonctionnement des cames	27
2.15	Plaque à cames complète	28
2.16	Plaque à cames pour effectuer des charges	28
2.17	Principe d'un métier cylindrique à 2 fontures	31

3.1	Représentation schématique des mailles lors de leur formation	34
3.2	Représentation schématique des boucles de charges lors de leur formation .	34
3.3	Symboles de base du langage « vermicelle »	35
3.4	Représentation du papier utilisé pour représenter les liages en calage côte ou interlock	35
3.5	Graphe de liage : jersey.	36
3.6	Tricot jersey	37
3.7	Les deux coupes du jersey.	37
3.8	Photo d'un tricot jersey	38
3.9	Graphe de liage du jersey tubulaire en calage côte	39
3.10	Photo d'un échantillon de tricot jersey tubulaire	39
3.11	Graphe de liage d'une côte 1 et 1 en calage côte	40
3.12	Photo d'un échantillon de tricot côte 1 et 1	41
3.13	Graphe de liage d'un tricot interlock 1 et 1 en calage jersey	41
3.14	Photo d'un échantillon de tricot Interlock 1 et 1	42
3.15	Graphe de liage d'une côte Richelieu 4/6 en calage côte	42
3.16	Photo d'un échantillon de tricot côte Richelieu 4/6	43
3.17	Graphe de liage de la côte derby 4 et 2 en calage côte	43
3.18	Photo d'un échantillon de tricot Côte Derby 4 et 2	43
3.19	Graphe de liage de la côte 1 et 1 tramée	44
3.20	Graphe de liage de la côte anglaise en calage côte	45
3.21	Photo d'un échantillon de tricot côte anglaise	45
3.22	Graphe de liage de la côte perlée en calage côte	46
3.23	Photo d'un échantillon de tricot Côte perlée	46
3.24	Graphe de liage d'un tricot issu du spacer 3D	47
3.25	Photo d'un échantillon de tricot issu du spacer 3D	48
4.1	Méthodes d'acquisition de connaissances	51
4.2	Le processus de développement en spirale dit itératif	52

TABLE DES FIGURES

4.3	Topologie obtenue par les différentes itérations du logiciel pour un même liage	54
2.1	Points de contact	64
2.2	Définition des points de contact en fonction de l'opération réalisée	66
2.3	Illustration de la règle du « déséquilibre »	67
2.4	Illustration de la règle du « déséquilibre » : géométrie générée	68
2.5	Influence de colonnes de mailles vides dans l'analyse du motif sur le liage d'une côte Richelieu 4/6	68
2.6	« Imbrication » de plusieurs lignes d'un motif	69
2.7	« Imbrication » de plusieurs lignes d'un motif : topologie générée	70
2.8	Imbrication des rangées de mailles dans un tricot interlock 1 et 1	70
2.9	Topologie générée par le liage correspondant à l'interlock 1 et 1	71
2.10	Graphe de liage d'un tricot issu du spacer 3D	71
2.11	Topologie générée pour un liage de tricot « type » spacer 3D	72
2.12	Illustration de la règle du « déséquilibre » d'un motif à deux fontures	73
2.13	Allongement de maille malgré l'égalité du nombre de mailles par colonne	73
2.14	Propagation de l'allongement dans un motif en cas d'inactivité temporaire d'une aiguille	74
2.15	Analyse du motif des trois représentations équivalentes du point de Rome	75
2.16	Ajout de points de contrôle dans le cas d'une maille avant	81
2.17	Interpénétration des fils qui partagent la même trajectoire sur une portion de maille dans un tricot à mailles chargées	82
2.18	Partage des point de contrôle	83
2.19	Méthode d'organisation des fils pour former un métacylindre	85
2.20	Exemple de correction de l'interpénétration des fils grâce aux métacylindre dans un tricot à mailles chargées	85
3.1	Architecture globale du logiciel au format UML	87
3.2	Application Tricot 3D	91
3.3	Modélisation d'un tricot jersey.	93

3.4	Modélisation d'un tricot interlock.	94
3.5	Modélisation d'une côte Anglaise.	94
3.6	Modélisation d'un tricot interlock relié.	95

Introduction

À l'heure du tout numérique, l'industrie de la maille s'intéresse, elle aussi, aux opportunités offertes par l'informatique graphique. Développer un outil de « prototypage virtuel » offrirait des avantages considérables. Cette avancée permettrait notamment d'examiner les caractéristiques visuelles ainsi que le comportement mécanique d'un échantillon de tricot sans être contraint de le manufacturer. L'impact financier d'un tel outil serait considérable puisqu'il contribuerait à libérer les métiers à tricoter monopolisés pour la confection de prototypes ; cet affranchissement redistribuerait les ressources auparavant amputées à l'activité de production.

Le 1er janvier 2005 l'accord multifibres de 1975 prenait fin. Cet accord allouait des quotas aux pays en développement pour exporter vers les pays riches. Les exportations chinoises de textiles vers l'Europe ont alors fortement augmenté. Le secteur du tricot européen pour l'habillement est durement frappé par cette concurrence. Ainsi, l'avenir du tricot en France pourrait, selon les experts de l'industrie [SCM+07], résider dans les tricots techniques. Les Textiles à Usages Techniques (TUT) sont des matériaux textiles répondant à des exigences technico-qualitatives élevées (performances mécaniques, thermiques, électroniques, durabilité, ...) leur conférant une aptitude à s'adapter à une fonction technique et à son environnement.

Les tricots techniques apportent des solutions nouvelles pour les secteurs industriels autres que l'habillement. Une des caractéristiques essentielles de cette industrie réside dans l'innovation, et la recherche et le développement qu'elle nécessite pour répondre aux contraintes imposées par les différents utilisateurs. Même si les débouchés de ces tricots particuliers sont multiples, trois segments applicatifs priment : l'industrie, le médical et le transport. Ainsi, un intérêt supplémentaire représenté par un outil de prototypage virtuel fournissant des modèles de tricot géométriquement et physiquement réalistes serait de disposer d'un outil de simulation des caractéristiques physiques et mécaniques de l'étoffe telles que l'isolation thermique, l'imperméabilité ou encore la résistance à l'effort.

Cette thèse a été financée par le conseil régional de Champagne-Ardenne dans le cadre du projet C.A.O. Maille, en partenariat avec l'IFTH (Institut Français du Textile et de l'Habillement) de Troyes. Il s'agit de la troisième thèse issue de cette collaboration née en 1995 avec la thèse de Jean-Michel Nourrit [Nou99] et prolongée avec la thèse d'Olivier

Nocent [Noc01]. Centre technologique au service de l'industrie, l'IFTH offre un ensemble de solutions pour la mise au point de nouveaux produits ou de nouveaux processus pour les différents marchés du textile à base de mailles que sont le transport, la santé, l'habillement ou le bâti.

Les deux précédentes thèses ont permis de tester et de développer des algorithmes et des modèles adaptés à la simulation des structures mailles en termes géométrique (trajectoire du fil, entrelacement des mailles) et mécanique (comportement élastique, extension et retour). Cette troisième thèse devait donc revêtir un caractère applicatif, ce qui en tant qu'ingénieur m'intéressait, et permettre le développement d'un prototype logiciel de simulation, destiné aux concepteurs de textiles tricotés. Cette modélisation 3D de la structure doit être obtenue à partir de données métier (type de liage et caractéristiques textiles à obtenir) usuelles pour les tricoteurs.

Dans une première partie, je vous présenterai d'abord les connaissances de base des techniques de bonneterie nécessaires à la compréhension des mécanismes de formation d'un tricot. Cette partie a pour but de fournir au lecteur les définitions et notions essentielles pour la compréhension de la suite du document ainsi qu'un aperçu de l'étendue des possibilités de liages et par conséquent, de l'ampleur de la tâche à réaliser. Puis, les connaissances plus pointues en matière de tricot n'étant pas formalisées, je vous décrirai le besoin d'une extraction de savoir-faire chez nos partenaires de l'IFTH et comment nous nous y sommes pris pour capter cette connaissance.

Puis, dans la deuxième partie, je décrirai notre logiciel de modélisation topologique de tricot. Dans un premier temps je définirai notre choix de modélisation d'une maille à l'aide des points de contact de cette maille avec ses voisines. Les trajectoires des fils formant les mailles sont représentées à l'aide de courbes splines. Ces premiers travaux ont fait l'objet d'une première communication sans acte lors du GTAS 05 [CPNR05]. Ensuite, je décrirai les règles de fonctionnement de notre moteur, grâce auxquelles il est possible de générer la topologie d'un liage à partir de sa représentation graphique. Cela a également fait l'objet d'une communication scientifique internationale avec actes [CPNNR06]. Puis je fournirai une description globale du logiciel : choix et enjeux, analyse, Interface Homme-Machine et quelques résultats y seront présentés. Ce travail est également l'objet d'une publication

soumise à REFIG [[CPNR08](#)].

Enfin, je conclurai ce mémoire en résumant les intérêts de ce travail et en présentant les perspectives d'évolution, dont plusieurs ont déjà fait l'objet de développements partiels et seront intégrées à moyen terme à notre logiciel.

Première partie

Analyse

Chapitre 1

État de l'art

Sommaire

1.1	La modélisation de textile	6
1.2	L'animation	8
1.3	Le rendu visuel	9
1.4	Le tricot au sein du laboratoire	10
1.4.1	La modélisation géométrique	10
1.4.2	Animation dynamique	11
1.4.3	Visualisation	15
1.4.4	Conclusion	15

1.1 La modélisation de textile

La simulation de textile, de par le grand nombre d'applications qui en découlent, a été largement traitée dans la littérature. Cependant, la plupart de ces travaux ont été réalisés sur la modélisation et le rendu à l'échelle macroscopique de structures tissées. La distinction entre textiles tissés et textiles tricotés est importante pour la simulation parce que leurs structures sont entièrement dissemblables et par conséquent, ils se comportent différemment à toutes les échelles. Le tissu est obtenu par l'entrecroisement de fils disposés perpendiculairement. Au niveau de ces entrecroisements la mobilité relative des fils

très restreinte conduit à une étoffe quasi inextensible avec peu de déformations dans la structure des fils. En revanche, les boucles imbriquées dans un tricot se déforment car le fil d'une maille glisse facilement au bénéfice de sa (ses) voisine(s), ce qui conduit à une surface plus extensible avec des disparités conséquentes au niveau de la structure même des mailles. Le comportement à petite échelle des tricots est également important parce que beaucoup de tricots sont constitués de fils plus épais que ceux utilisés pour le tissu, ce qui signifie que le fil de structure est bien visible et doit se comporter correctement pour des résultats réalistes.

Il est donc important de choisir la bonne « granularité » dans la modélisation et ainsi de déterminer l'élément unitaire de notre modèle : serait-ce la maille, un groupe de mailles, un fil, l'étoffe complète ... ? Une des principales et premières démarches est de traiter de manières indépendantes l'étoffe et sa texture (aspect local) ce qui permet d'animer ce tricot de manière relativement « économique » en temps de calcul. Il suffit, en effet, au moment de l'animation, de modifier la forme de l'étoffe puis d'appliquer la texture pour améliorer le rendu visuel. Cependant, la complexité de l'élaboration de la texture est l'inconvénient majeur de cette méthode. Le but de ma thèse étant de parvenir à un outil de prototypage virtuel et ainsi de réduire la nécessité de fabriquer des prototypes, il paraît aberrant de chercher à numériser des étoffes préalablement tricotées. Les recherches de Gröller [GRS95], basées sur les textures volumiques [PH89] [Ney95], proposaient certes un rendu de bonne qualité, mais un nombre très restreint de liages. Par ailleurs, il n'y a pas de véritable lien entre les déformations des textures et les mailles qu'elles représentent. Pour autant, cette démarche a le mérite d'être raisonnable en termes de temps de calcul.

Largement répandu dans la plupart des secteurs industriels, l'usage d'outils de conception assistée par ordinateur (C.A.O.) reste marginal dans les entreprises du secteur textile. Ces outils font particulièrement défaut dans le domaine de la maille, en raison de la complexité du processus de tricotage et de la puissance de calcul jusqu'alors insuffisante des ordinateurs. Il n'existe actuellement aucune solution complète de C.A.O. adaptée aux structures tricotées. Une avancée importante en matière de modélisation, est celle de Meißner et Eberhardt [ME98]. Leur approche consiste à réaliser une modélisation topologique du tricot : la position et la forme des mailles sont déterminées à partir d'une

description métier (utilisée par les métiers à tricoter de marque STOLL). Ils effectuent ensuite un raffinement de la topologie à l'aide de méthodes d'animation de systèmes de particules pour donner un aspect réaliste au tricot. Ce travail reste cependant limité à des tricots à topologie simple, sans charge (doublement des boucles, pour la côte perlée par exemple) ne tenant pas compte des caractéristiques mécaniques des fils, ni des paramètres fondamentaux du tricotage tels que la jauge (nombre d'aiguilles par unité de longueur), la L.F.A. (longueur de fil absorbée pour une maille, qui détermine avec l'épaisseur du fil, la densité linéique en relation avec la densité de la matière et en particulier son volume apparent). Par ailleurs, les modèles qu'ils génèrent ne sont pas tridimensionnels et sont utilisés pour des représentations schématiques limitées au seul contrôle d'erreur par le tricoteur. D'autre part, le rendu visuel des tricots obtenus reste relativement sommaire.

1.2 L'animation

L'approche principalement utilisée dans la communauté de l'informatique graphique, est de traiter les tissus comme des surfaces sans épaisseur, élastiques, linéaires et isotropes. Le textile est représenté dans les modèles physiques par une grille de points massiques et la position de ces points dans l'espace est calculée en fonction des contraintes appliquées au textile. On peut distinguer deux types de méthodes : les méthodes visant à minimiser l'énergie du système [Fey86] [BDP92] [BDM94] et les méthodes générant les équations différentielles décrivant le mouvement à l'aide des forces appliquées aux points du système [TDK87]. Pour résoudre les équations du mouvement du système physique Baraff et Witkin [BW98] utilisent une méthode d'intégration d'Euler implicite. Des extensions de ces modèles ont mis l'accent sur l'accélération du temps de calcul, en proposant une méthode d'intégration implicite déduite de la méthode du point milieu pour résoudre les équations du mouvement d'un système masses-ressorts [VT00], la révision des modèles de pliage [BRR03], ou la stabilité de traitement des collisions [BRJ02]. [Pro95] a introduit une limite d'étirement de l'étoffe en utilisant un processus itératif limitant les efforts d'étirement.

Certains ont utilisé les modèles à base de particules plutôt que le « classique » modèle

masses-ressorts [VT00] [BW98]. Ce dernier a l'avantage que les particules soient libres d'interagir avec toutes les autres particules, alors que dans le modèle masses-ressorts une particule ne peut interagir qu'avec ses « voisines » au sein d'un réseau structuré. Cependant dans la pratique, devant le grand nombre de particules et l'importante combinatoire qui en découle, on utilise également une notion de voisinage pour calculer les interactions. Dans leurs travaux, Breen et ses collaborateurs [BDP92] exploitent cette flexibilité du modèle pour simuler le drapé d'un tissu. L'énergie potentielle du système est composée d'une énergie de répulsion pour parer le chevauchement de matière et d'énergie de cohésion pour résister à la traction, à la flexion et au cisaillement. Dans [BDM94], ils améliorent leur travail en se servant des données expérimentales issues des tests de Kawabata [Kaw80]. Eberhardt [EWS96] propose un modèle dynamique de tissu à base de particules en s'inspirant également des mesures expérimentales de Kawabata.

Comme nous l'avons déjà précisé auparavant, en raison de leur complexité comparée aux étoffes tissées, les tricots ne sont pas tant étudiés. Eberhardt et son équipe [EMS00] modélisent le tricot comme une surface continue soumise à des forces de courbure tirées des mesures expérimentales de Kawabata. Les récents travaux de Kaldor [KJS08], proposent un nouveau modèle de simulation de textiles tricotés. Chaque fil est considéré comme inextensible, et est modélisé par une courbe B-spline flexible. Kaldor propose une méthode d'intégration hybride à la fois implicite et explicite, avec des contraintes d'inextensibilité imposées aux fils en utilisant des projections efficaces. Cette simulation permet d'obtenir une modélisation réaliste de l'état relâché de l'étoffe à partir de son état étiré. Cependant, on ne sait pas comment est obtenu cet état de départ et seulement les liages les plus simples (sans charge par exemple) peuvent être modélisés.

1.3 Le rendu visuel

Dans le domaine du rendu visuel et dans le cadre plus simple des textiles, J.F. Blinn et M.E. Newell [BN76] ont proposé un modèle de micro-facettes qui simule la surface d'un objet en utilisant des fonctions de distribution de facettes microscopiques. Plus tard, Yasuda et al. [YYTI92] ont introduit des composantes supplémentaires (réflexion

spéculaire et réflexion interne, notamment) dans le modèle d'éclairage. Ils ont ainsi autorisé un plus grand réalisme dans la simulation des interactions entre la lumière et la matière, en utilisant des paramètres issus de mesures photométriques effectuées sur des échantillons réels.

Par ailleurs d'autres recherches plus récentes [XCL⁺01] sur la visualisation des tricots, issues de la méthode des lumigraphes, introduisent des limitations, concernant notamment le modèle d'éclairage (qui exprime les interactions entre la lumière et la matière) réduit à sa composante diffuse pour des raisons de volume de données.

1.4 Le tricot au sein du laboratoire

Cette thèse est la continuité d'une collaboration industrielle avec l'IFTH (Institut Français du Textile et de l'Habillement) de Troyes. Centre technologique au service de l'industrie, l'IFTH offre un ensemble de solutions pour la mise au point de nouveaux produits ou de nouveaux processus pour les différents marchés du textile à base de mailles que sont le transport, la santé, l'habillement ou le bâti. Ce partenariat est né en 1995 avec la thèse de Jean-Michel Nourrit [Nou99] et s'est poursuivi avec la thèse d'Olivier Nocent [Noc01], puis avec le projet « CAO Maille » financé par la région Champagne-Ardenne comme cette thèse qui y est attachée.

1.4.1 La modélisation géométrique

L'enjeu était de fournir une modélisation géométrique paramétrable et réaliste des mailles impliquées dans les liages. Cette étape est d'importance puisque cette modélisation géométrique devait fournir les formes des boucles utilisées dans les modules d'animation et de visualisation développés au sein du laboratoire. La solution proposée dans la thèse de Jean-Michel Nourrit [Nou99] était une modélisation à l'échelle mésoscopique « basée fil », où la boucle de maille était caractérisée par une courbe spline 3D modélisant l'axe central du fil la constituant. Le choix de la forme particulière de cette spline (Catmull-Rom [CR74]) était dû à son appartenance à la famille des courbes paramétriques définies par « barycentres paramétriques » d'un ensemble de points de contrôle, à sa nature inter-

polante et à la méthodologie proposée pour positionner des configurations par symétrie. Jean-Michel Nourrit modélisait une maille « standard » (telle qu'on la trouve dans un tricot jersey simple) à l'aide de 8 segments contigus de Catmull-Rom définis à partir de onze points de contrôle de la courbe spline modélisant le fil (Figure 1.1).

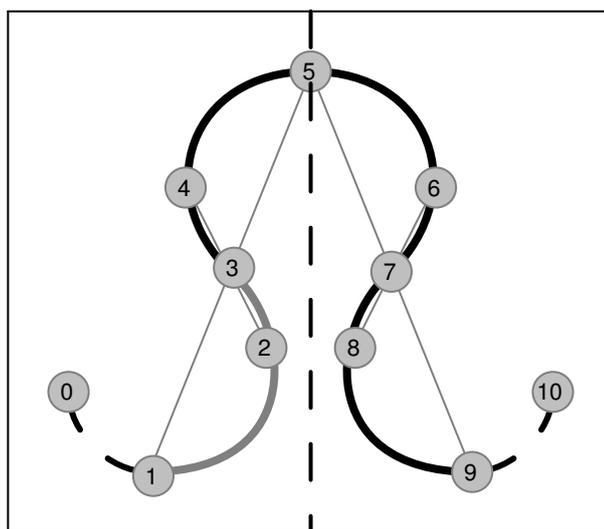


FIG. I.1.1 – Construction d'une boucle

La maille ainsi modélisée possédait des propriétés géométriques très intéressantes, que l'on peut observer sur la figure 1.1 : le segment compris entre les points 3 et 5 est le symétrique du segment entre les points 1 et 3 par rapport au point 3. De même, on peut remarquer que le segment compris entre les points 5 et 9 est le symétrique du segment 1–5 par rapport à l'axe vertical de la maille passant par le point 5. Ces boucles « standard », en fonction du liage, pouvaient être déformées par une méthode de type « Free Form Deformation » : les déformations de la boîte englobante de la maille induisant les déplacements de ses points de contrôle et donc les déformations de la maille [SP86] [Vin92].

1.4.2 Animation dynamique

Si la modélisation géométrique permet d'envisager la déformation des boucles et ainsi de simuler un ensemble de situations, il faut disposer d'un moyen automatique et physiquement exact d'obtenir ces déformations pour que la méthode de simulation soit à la fois utilisable et réaliste.

1.4.2.1 Splines matérielles dynamiques

À l'issue de la modélisation géométrique, les fils étaient donc déjà modélisés par des courbes splines dont les points de contrôle allaient être rendus mobiles, conférant ainsi une déformabilité temporelle aux fils. L'animation des fils était alors obtenue en animant les points de contrôle. L'originalité de la méthode développée alors était de ne pas considérer les points de contrôle comme des particules massiques discrétisant les fils mais plutôt comme des degrés de liberté d'un système mécanique continu. L'évolution de ce système mécanique à nombre fini de degrés de liberté était obtenue en utilisant les équations de Lagrange [RNG99] [RNN00]. Conformément au formalisme lagrangien, le modèle initial de courbe spline (modèle géométrique du fil) était enrichi en lui conférant une répartition massique continue. Les degrés de liberté d'une courbe spline matérielle étaient les coordonnées 3D de ses points de contrôle [RNN00].

1.4.2.2 Application au tricot

Pour la réussite de l'animation du tricot, il fallait déterminer les contacts entre les fils. Jean-Michel Nourrit [Nou99] proposa alors une modélisation des contacts par contraintes gérées par la méthode des multiplicateurs de Lagrange permettant ainsi l'application de l'effort réellement nécessaire pour maintenir la contrainte réalisée quelles que soient les sollicitations du système. Il était de plus préférable de proposer uniquement des contraintes linéaires à coefficients constants en fonction des degrés de liberté du système de manière à conserver la constance temporelle de la matrice du système mécanique. De ce fait, si instinctivement ils étaient tentés d'utiliser des contraintes de distance, cela était impossible dans ce contexte. C'est pourquoi une autre modélisation des contacts a été choisie.

Partant du constat que les points de contacts correspondaient systématiquement (dans la modélisation géométrique de « repos ») aux points de contrôle, Jean-Michel Nourrit avait supposé que les fils ne glissaient pas l'un sur l'autre et donc qu'ils restaient en contact au niveau de ces points de contact tout au long de l'animation. Cette observation faite, on créait deux triangles formés respectivement par le point de contrôle impliqué dans le contact avec son antécédent et son suivant sur le fil correspondant. Jean-Michel Nourrit

assurait le contact entre les fils en obligeant chacun des deux points de contrôle impliqués dans un contact à rester en des coordonnées barycentriques constantes dans le triangle formé par son homologue dans le contact. De manière plus explicite, si on observe la figure

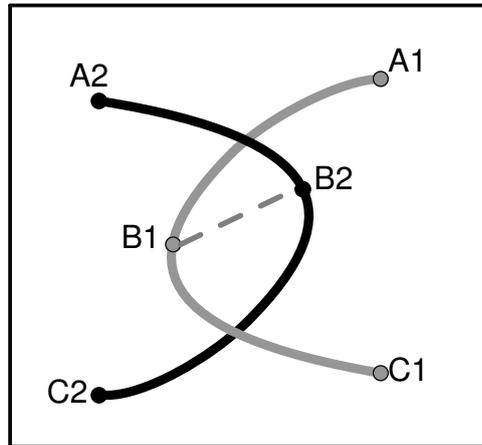


FIG. I.1.2 – Modélisation des contraintes barycentriques pour assurer le contact entre les fils

1.2, $B1$ (respectivement $B2$) devait rester en même position barycentrique dans le triangle $A2B2C2$ (respectivement $A1B1C1$) durant toute l'animation. Cette contrainte holonome permettait ainsi à $B1$ et $B2$ de conserver les mêmes coordonnées barycentriques dans les triangles $A1B1C1$ et $A2B2C2$. Cependant, ces contraintes ne suffisaient pas à assurer des contacts réalistes. Elles laissaient en effet aux plans osculateurs $A_iB_iC_i$ des axes des deux fils la possibilité de se croiser ; dans ce cas les fils s'interpénétraient et leur orientation relative s'inversait. Pour maintenir ces plans approximativement perpendiculaires, Jean-Michel Nourrit ajoutait quatre ressorts de compression non linéaires entre les sommets « extérieurs » des 2 triangles comme le montre la figure 1.3. Assurer le maintien d'un point de contact entre deux fils nécessite donc l'ajout de quatre ressorts et de deux contraintes de coordonnées.

1.4.2.3 Réduction de paramétrage

En fait, le paramétrage d'un morceau d'étoffe est donné par les positions des points de contrôle de chaque fil qui le constitue. Comme nous l'avons vu précédemment, les

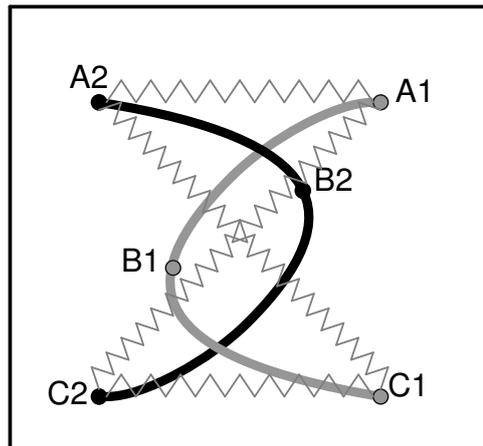


FIG. I.1.3 – Ressorts d'orientations permettant de prévenir les croisements de fils

contraintes de contact entre les fils choisies par Jean-Michel Nourrit assuraient la structure des boucles. Ces contraintes réduisaient le nombre de degrés de liberté de la pièce d'étoffe mais augmentaient de manière très importante le nombre d'inconnues du système, ajoutant de nouvelles inconnues dues aux multiplicateurs de Lagrange. La taille déjà importante du système d'équations à résoudre augmentait considérablement du fait de ces contraintes. Par conséquent, considérant ce grand nombre d'inconnues intervenant dans la résolution du système comme des efforts réduisant l'ensemble des configurations possibles plutôt que comme de nouveaux degrés de liberté du tricot, une réduction de paramétrage était tout à fait adaptée à la situation.

Pour la réduction du paramétrage, Olivier Nocent [Noc01] avait choisi d'utiliser un volume paramétrique englobant l'ensemble des mailles de l'étoffe. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, l'épaisseur du tricot ne peut être négligée. Mais puisque cette épaisseur est petite vis-à-vis de la longueur et de la largeur d'un échantillon d'étoffe, il a opté pour un volume dont la variation paramétrique en épaisseur est linéaire plutôt qu'un volume spline dans les trois directions. Ainsi, grâce à une hypothèse simplificatrice mais toujours dans le souci de conserver un comportement macroscopique le plus réaliste possible, un mécanisme de niveau de détail était mis en place en vue de se rapprocher du nombre véritable de degrés de liberté de l'étoffe.

Cette approche a permis de restreindre notablement le nombre d'inconnues du système mécanique. De plus, une réduction de paramétrage judicieusement choisie autorisait la

prise en compte de nombreuses contraintes de contact entre fils.

1.4.3 Visualisation

Jean-Michel Nourrit avait à sa disposition, nous avons déjà évoqué ce point plusieurs fois, les points de contrôle de la trajectoire des fils. Il considérait donc la surface d'un fil comme un cylindre généralisé défini par la courbe spline correspondante car il souhaitait aborder le rendu de mailles de manière semblable à celle qu'il avait utilisée pour animer un tricot. Il avait donc choisi une technique de lancer de rayons [Whi80], en accord avec la modélisation des fils comme objets linéiques. Cet algorithme était en effet le mieux adapté à la visualisation de cylindres généralisés [Bin71]. Par ailleurs, il permettait d'obtenir des images réalistes dans des temps de calcul acceptables, et restait suffisamment général pour permettre d'intégrer à la scène des objets non textiles.

1.4.4 Conclusion

Ainsi, lors de sa thèse, Jean-Michel Nourrit [Nou99] a mis en place un modèle infographique de tricot capable de mettre en évidence les particularités de ce type de textile. Il avait, pour cela, introduit un modèle de fil défini à partir de courbes splines matérielles dynamiques. De plus, au cours de sa thèse, Olivier Nocent [Noc01] a notamment utilisé le modèle des variétés splines pour mettre en œuvre une méthode de réduction de paramétrage afin d'accroître les performances de production d'animations dynamiques de textiles tricotés. Cette réduction de paramétrage s'inscrivait dans un souci de diminuer considérablement la taille du système tout en continuant de manipuler un modèle continu. Nous disposons donc d'un modèle géométrique et mécanique explicite, fondé sur une étude approfondie des mailles et des techniques de fabrication de l'industrie textile.

Ce modèle est cependant basé sur un état de repos dont le calcul présente des défauts :

- Certains types de liages ne sont pas pris en compte (entre autres les charges).
- L'obtention de cet état de repos n'est pas basée sur le type de données utilisé dans l'industrie pour commander les métiers.
- Le calcul de cet état de repos est plus phénoménologique que réellement simulé (les

phénomènes de relaxation à l'issue du tricotage ne sont pas simulés, les boucles ont une géométrie pour partie issue de l'observation empirique).

Le but de cette nouvelle thèse est donc de travailler à l'obtention d'un état de repos conforme à partir de données métiers décrivant toutes sortes de liages.

Chapitre 2

Techniques industrielles de tricotage

Sommaire

2.1	L'industrie de la maille : la bonneterie	17
2.2	Fabrication industrielle des tricots	19
2.3	Les fils	30

2.1 L'industrie de la maille : la bonneterie

Le terme de bonneterie désigne la fabrication et le commerce de vêtements et d'étoffes à mailles, la technique utilisée par cette industrie étant le tricotage. Le domaine de la bonneterie est très vaste car les articles produits sont très divers. Nous pouvons citer les articles chaussants (bas, collants, chaussettes), les sous-vêtements masculins (maillots de corps, tee-shirts, slips), les sous-vêtements féminins, les vêtements de dessus, les maillots de bain, la layette, les gants, les articles de maintien, les rideaux, les fourrures artificielles etc. Des produits à usage industriel (emballages, supports d'enduction) et médical (stents, orthèses) sont également tricotés.

La bonneterie est donc une industrie multiple et complexe. C'est une industrie relativement jeune puisque le tricotage est resté manuel jusqu'à la fin du seizième siècle. En 1656, Louis XIV créa la première manufacture française de bonneterie mécanique avec des métiers à bâti de bois et les premiers métiers à la base du matériel actuel ne furent

créés qu'entre 1860 et 1900. L'aiguille à clapet, qui est utilisée sur la plupart des machines modernes, fût inventée en 1853. Elle permit, en 1866, la construction du premier métier rectiligne appelé tricoteuse LAMB du nom de son inventeur américain, bien qu'il fût reconnu en 1867, lors de l'Exposition Universelle de Paris, qu'une machine très similaire fut créée, la même année, par un français nommé E. Buxtorf.

Depuis sa création, la tricoteuse n'a cessé d'évoluer : la machine actuelle, entièrement automatique, offre de très grandes possibilités de tricotage. Une évolution s'est alors imposée à nous, informaticiens : et si nous rendions possible le prototypage virtuel afin de rendre notre industrie plus concurrentielle et de permettre aux bonnetiers de tester *in virtuo* de nouveaux tricots. En effet, le prototypage virtuel pourrait accélérer la conceptualisation de nouveaux modèles, il permettrait aussi de se passer de la fabrication de certains prototypes réels, ce qui aurait le double mérite d'économiser les coûts de production impliqués tout en libérant les machines de productions réquisitionnées par ces prototypages.

Si l'opération de tissage consiste à entrelacer deux ensembles de fils, appelés la chaîne et la trame, disposés de façon rectiligne et se croisant à angle droit (figure 2.1(a)), le tricotage permet l'obtention d'une étoffe en recourbant un seul fil de façon à former des boucles, appelées mailles, qui s'entrelacent entre elles (figure 2.1(b)). L'examen des deux

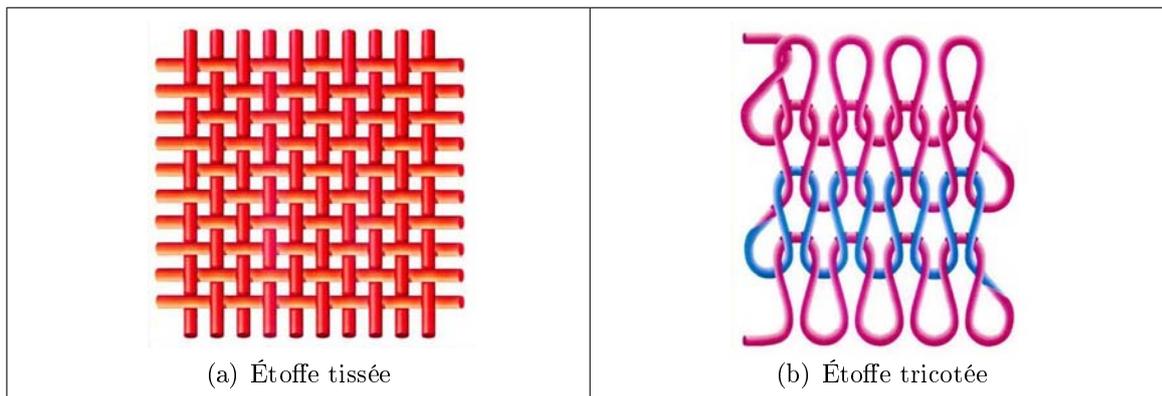


FIG. I.2.1 – Illustration des différences entre le tissage et le tricotage

figures citées permet de bien appréhender la différence essentielle entre le tissu et le tricot : la disposition rectiligne des fils dans un tissu ne permet l'obtention d'une étoffe extensible que si les fils eux-mêmes sont extensibles. Par contre, dans un tricot, les mailles peuvent

se déformer même si les fils sont inextensibles. De plus, les différentes combinaisons de liages peuvent conférer au tricot de l'épaisseur ce qui n'est pas le cas du tissu pour lequel il n'y a aucune variation dans l'entrelacement des fils. C'est sans doute la raison pour laquelle les premiers articles tricotés ont été des pièces vestimentaires qui exigent une adaptation étroite de l'étoffe aux formes du corps qu'elle recouvre (bas, bonnet, sous-vêtements...). Cette aptitude à la déformation explique le développement considérable du champ d'application de la maille dans d'autres domaines que celui de l'habillement, tels que le milieu médical ou celui de la construction automobile par exemple.

Une maille, ou une boucle (nous emploierons indifféremment les deux termes par la suite) est constituée d'une longueur de fil dont la disposition est représentée figure 2.2 et peut être divisée en trois parties : la tête (partie centrale), les jambes (parties latérales) et les pieds (extrémités).

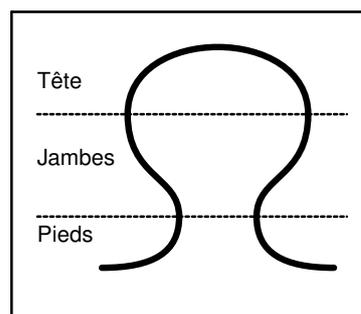


FIG. I.2.2 – Anatomie d'une maille

2.2 Fabrication industrielle des tricots

Un tricot est formé par l'imbrication d'un grand nombre de mailles. De ce fait, l'aspect du tricot est différent selon que les parties visibles de la maille sont les jambes ou la tête et les pieds. La figure 2.3(a) montre la face endroit d'un tricot sur laquelle la tête et les pieds d'une maille sont cachés par les jambes des mailles supérieures et inférieures. En conséquence, les mailles sont appelées mailles endroit lorsque les jambes sont au premier plan. Inversement, l'autre face du tricot montre la tête et les pieds des mailles (figure 2.3(b)). Ce sont des mailles envers et la face du tricot correspondante est dite face envers.

Le tricot le plus simple est le jersey : sur une de ses faces, on n'aperçoit que des mailles endroit, tandis que l'autre face ne présente que des mailles envers.

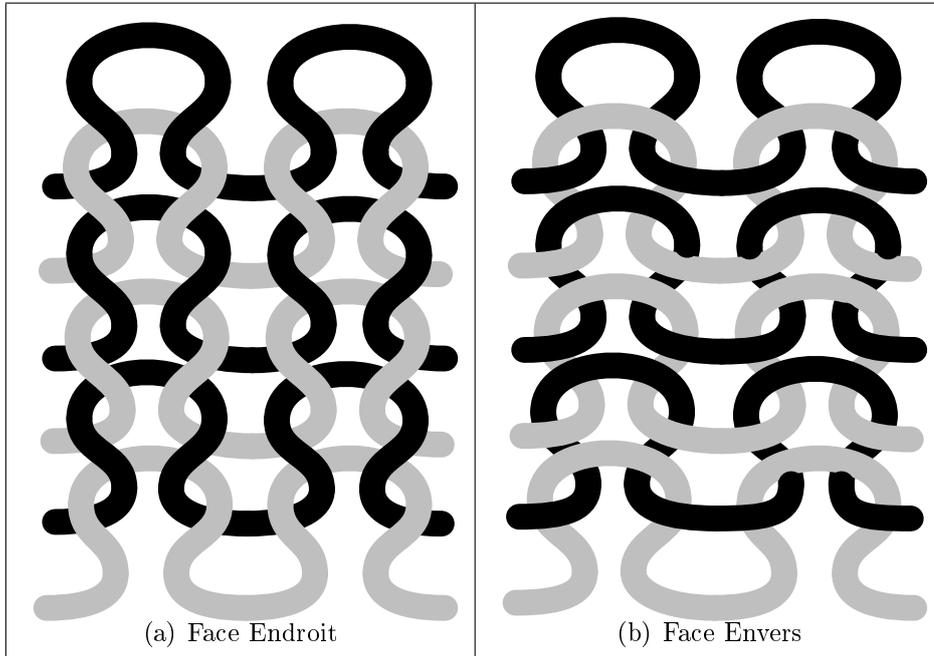


FIG. I.2.3 – Les deux faces d'un tricot

En résumé, voici quelques définitions que nous utiliserons par la suite :

- Maille endroit : une maille dont les jambes sont au premier plan.
- Maille envers : une maille dont la tête et les pieds sont au premier plan.
- Colonne de mailles : ensemble de mailles entrelacées « verticalement » les unes au dessus des autres (et les unes dans les autres).
- Rangée de mailles : ensemble de mailles juxtaposées « horizontalement » les unes à côté des autres, dans la continuité du fil.

Les tricots produits par les métiers à tricoter industriels comportent au plus autant de colonnes de mailles que le métier compte d'aiguilles. Ces aiguilles, dites « aiguilles à clapet », sont terminées par un crochet (le « bec ») et disposent d'un clapet dont la rotation permet de fermer le bec ou de l'ouvrir (figure 2.4). L'autre extrémité du corps d'aiguille est munie d'un talon qui permettra, grâce à des cames (« chariot »), d'imposer à l'aiguille les différents mouvements nécessaires à la formation de la maille.

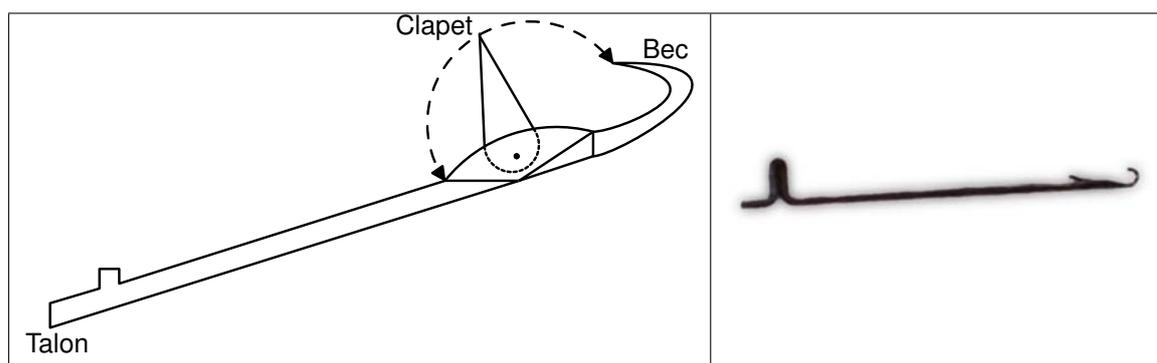


FIG. I.2.4 – Aiguille à clapet

La figure 2.5 détaille les différentes étapes de la formation d'une maille sur une aiguille à clapet :

1. L'aiguille est dans sa position la plus basse ; on vient d'abattre une maille. L'aiguille retient une colonne de mailles qui restera toujours plus ou moins dans le même plan vertical. La dernière maille de cette colonne prise dans le bec est appelée ancienne maille.
2. L'aiguille monte ; l'ancienne maille restant quasi-immobile ouvre le clapet et tombe sur la tige de l'aiguille, puis l'aiguille atteint sa position d'ascension complète.
3. L'aiguille amorce sa descente ou mouvement de chute, le nouveau fil est saisi, on appelle cette étape le « cueillage ».
4. L'aiguille continue de descendre, l'ancienne maille ferme le clapet et passe par-dessus ; sa chute du haut de l'aiguille provoque son « abattage » lorsqu'elle vient tomber sur les pieds de la boucle nouvellement formée.
5. L'aiguille redescend jusqu'en son point le plus bas, ce qui provoque la formation de la nouvelle maille.

La formation de la maille que nous venons de décrire confirme que l'aiguille à clapet a grandement contribué à la mécanisation du tricotage. Toutefois, le tricotage sur une aiguille n'aurait pas permis cette mécanisation. L'idée de base repose alors sur l'utilisation d'un ensemble d'aiguilles disposées côte à côte.

Pour réaliser un tricot jersey de n colonnes, il suffit donc de disposer n aiguilles dans le plan les unes à côté des autres, parallèles entre elles et à égale distance les unes des autres.

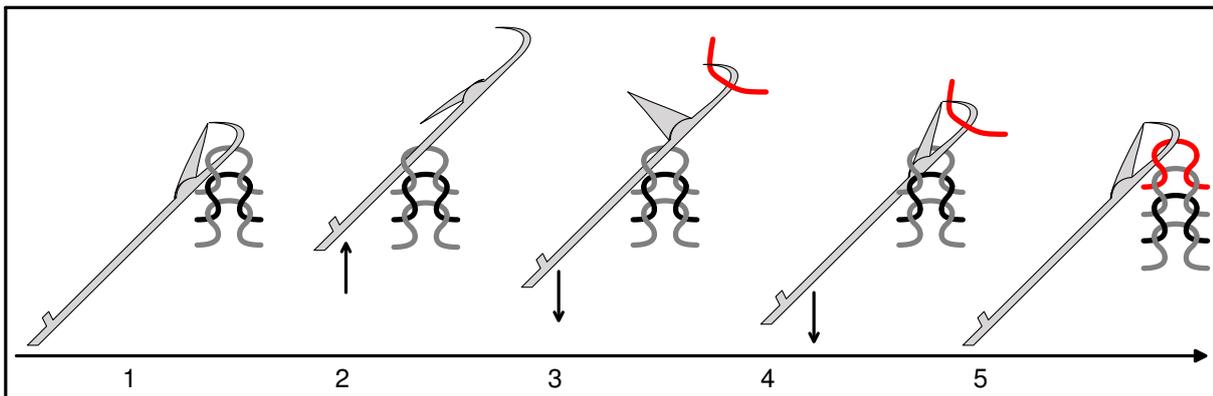


FIG. I.2.5 – Formation d'une maille

Chaque aiguille devra être mobile pour recevoir les mouvements d'ascension et de chute nécessaires à la formation de la maille. Sur un métier rectiligne, les aiguilles effectuent leur

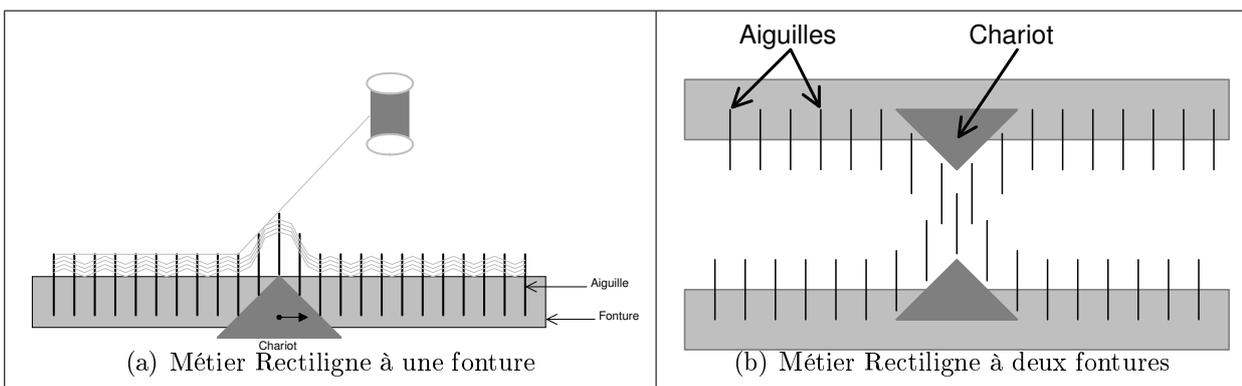


FIG. I.2.6 – Les métiers rectilignes

mouvement à tour de rôle grâce à un chariot (sorte de came en translation) qui se déplace dans le sens de leur support (« fonture ») en les actionnant une à une (figure 2.6(a)).

Les aiguilles sont alimentées en fil au moyen d'un guide-fil qui parcourt les fontures en même temps que le chariot qui l'entraîne (figure 2.7). Les métiers à tricoter industriels disposent en fait de deux jeux d'aiguilles (figures 2.6(b) et 2.8). Sur un tel métier, on peut faire fonctionner alternativement une aiguille d'une fonture et l'aiguille correspondante de l'autre fonture, permettant ainsi de faire coexister sur une rangée (ligne de mailles) à la fois des mailles endroit et des mailles envers, ce qui serait impossible sur un métier doté d'une seule fonture.

Si les aiguilles sont placées en opposition pour qu'une aiguille dont le talon est tourné



FIG. I.2.7 – Métier à tricoter rectiligne



FIG. I.2.8 – Vue du dessus d'un métier à tricoter rectiligne à 2 fontures où l'on a tricoté uniquement sur la fonture arrière

vers l'observateur succède à une aiguille dont le talon lui est opposé , la rangée de mailles formée est constituée alternativement de mailles endroit et de mailles envers.

La juxtaposition de n systèmes de deux aiguilles ainsi disposées permet donc d'obtenir le tricot côte 1 et 1 (figure 2.9). Pour tricoter la côte 1 et 1, il faut utiliser deux lits d'aiguilles identiques à celui défini pour le tricotage du jersey. La position relative des deux fontures est telle que les aiguilles soient en opposition et en quinconce.

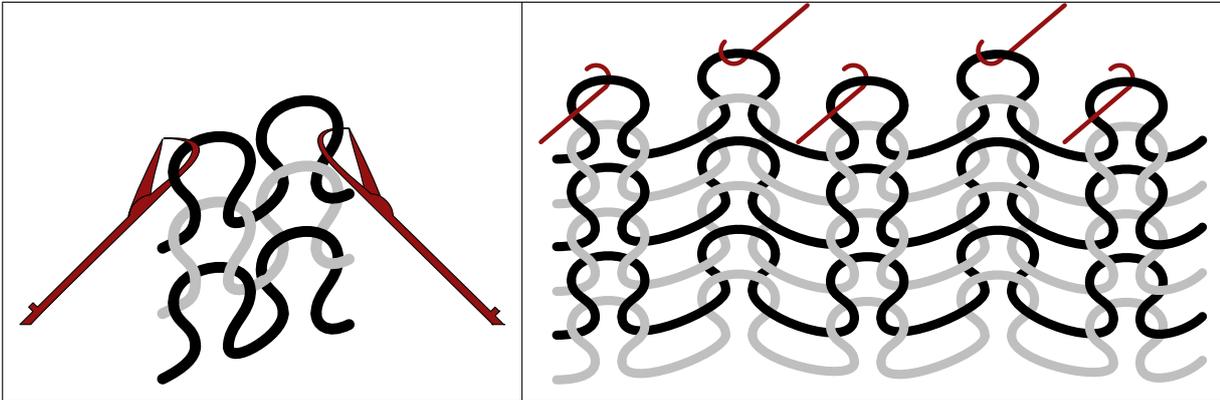


FIG. I.2.9 – Juxtaposition d'aiguilles placées en opposition

Les métiers rectilignes offrent de nombreuses options pour la confection de tricot : on peut désactiver des aiguilles lors de certains passages du chariot, décaler les fontures pour élargir le tricot ou pour passer le tricot d'une fonture à l'autre, ou limiter le mouvement des aiguilles pour réaliser des charges. Nous avons vu précédemment que lorsqu'on tricote normalement, on « abat » sur chaque aiguille ce qui a pour effet de former une maille sur chaque aiguille. Il est également possible de « cueillir » le fil sans abattre, on crée ainsi une charge qui vient se superposer à la tête de la maille (figure 2.10).

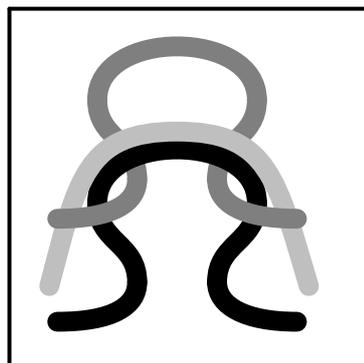


FIG. I.2.10 – Maille chargée

La formation de la charge fait appel à deux passages du chariot (figure 2.10). La maille

chargée est obtenue par ascension incomplète de l'aiguille (la maille dans le bec ouvre le clapet sans le dépasser) lors du premier passage du chariot selon les étapes suivantes illustrées sur la figure 2.11 :

1. L'aiguille est en position basse et retient une maille dans son bec.
2. L'aiguille effectue son mouvement d'ascension que l'on arrête alors que l'ancienne maille repose encore sur le clapet de l'aiguille. C'est une « demi ascension ».
3. L'aiguille amorce son mouvement de chute, cueille le fil puis descend jusqu'à son point le plus bas, retenant dans son bec l'ancienne maille et le fil cueilli qui constitue la charge.
4. L'aiguille monte en ascension complète, l'ancienne maille et la charge tombent sur le corps de l'aiguille.
5. Le mouvement de chute s'effectue, l'aiguille cueille une boucle de fil qui devient la nouvelle maille ; l'abattage simultané de l'ancienne maille et de la charge s'effectue sur cette nouvelle maille.

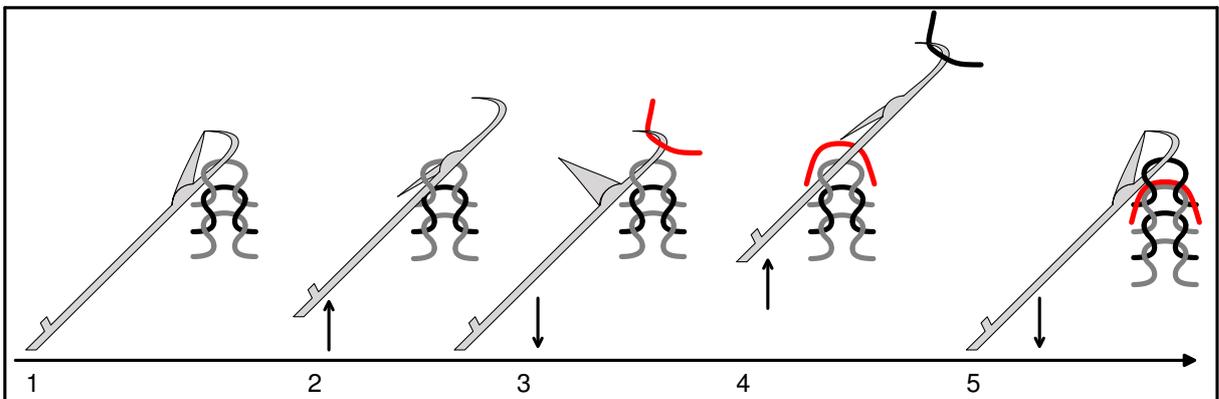


FIG. I.2.11 – Cycle de formation d'une maille chargée

La figure 2.12 montre ici l'insertion d'une charge dans un tricot jersey.

Il existe également un procédé appelé le tramage qui complète les possibilités déjà étendues de conception de tricots. Sans approfondir son étude, ce procédé mérite d'être signalé car il peut conférer au tricot une qualité nouvelle et/ou un aspect particulier. Cette opération consiste à insérer un fil dans un tricot suivant le sens des rangées sans

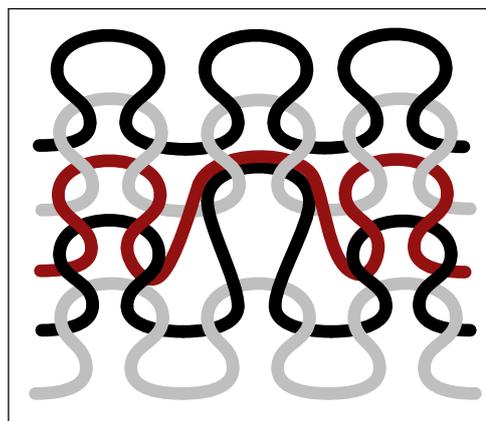


FIG. I.2.12 – Influence d’une charge dans un jersey endroit

que ce fil ne fasse partie d’aucune maille (figure 2.13). Le fil est donc rectiligne et de ses qualités dépendent les caractéristiques du tricot. Un fil de trame élastique améliorera la

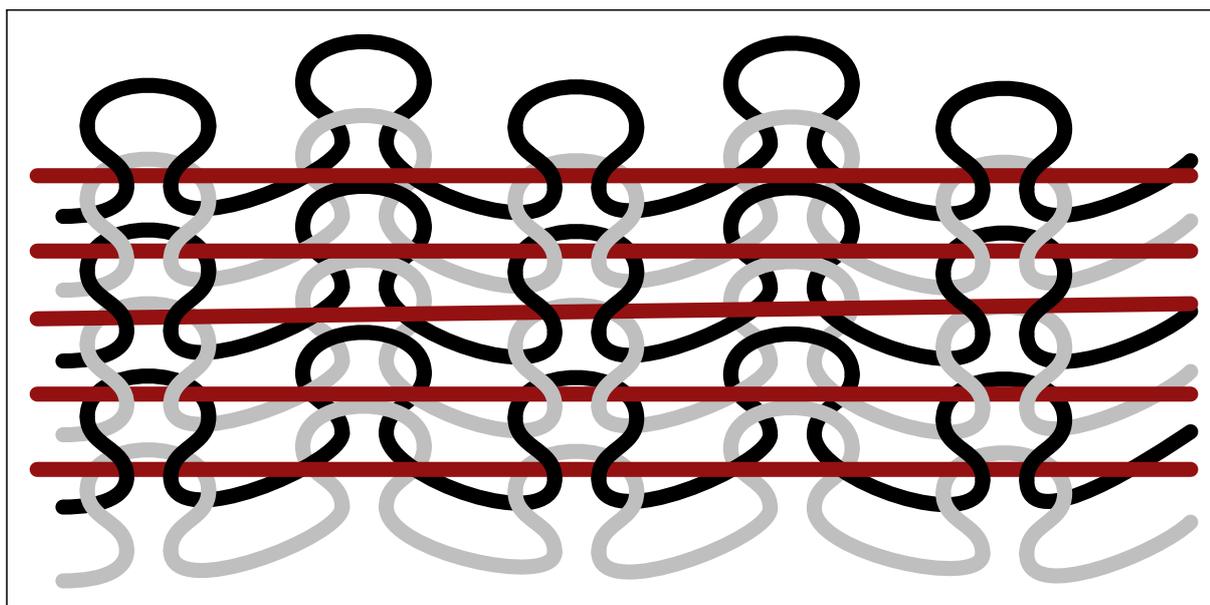


FIG. I.2.13 – Tricot côte 1 et 1 tramé

reprise élastique du tricot ; par contre, un fil de trame peu extensible rendra le tricot peu déformable dans le sens des rangées. Une rangée « tramée » est bien constituée de deux fils : un fil de fond formant les mailles et un fil de trame « coincé » au milieu des colonnes de mailles.

Comme nous l’avons vu précédemment, pour former leurs mailles, les aiguilles sont po-

sitionnées et guidées dans des rainures fraisées dans une plaque métallique appelée fonture. La formation de la maille nécessite les mouvements d'ascension et de chute de l'aiguille. La fonture étant fixe, les aiguilles ont chacune la possibilité de monter et descendre dans

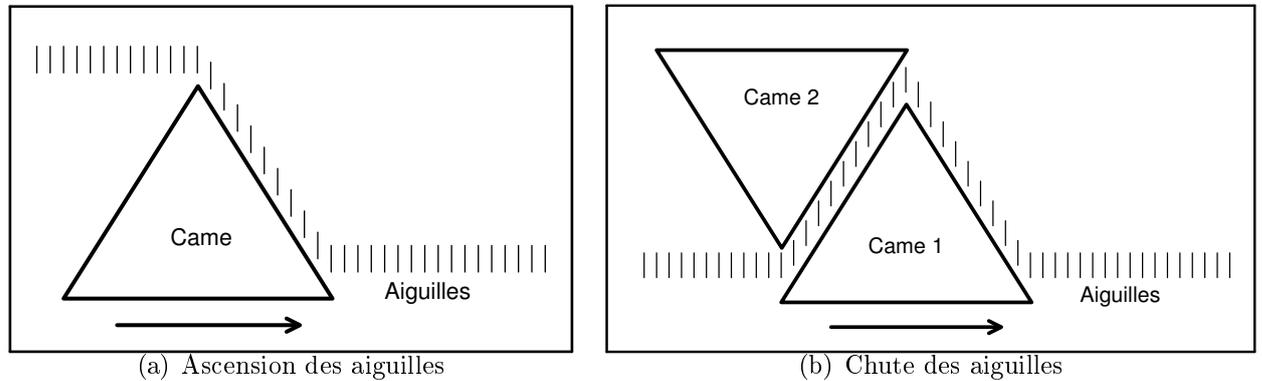


FIG. I.2.14 – Principe de fonctionnement des cames

leur rainure grâce à l'action de la came. Cette dernière est en forme de triangle, pointe dirigée vers le haut, disposée de telle manière que sa base se trouve juste au dessous du niveau des talons d'aiguilles (figure 2.14(a)). Par exemple, sur la figure 2.14(a), la came se déplace de gauche à droite, elle attaque les talons des aiguilles d'où l'obtention du mouvement d'ascension.

En observant ce principe de fonctionnement, il apparait clairement la nécessité d'une came de chute pour déclencher la chute des aiguilles une fois qu'elles ont atteint le sommet de la came (figure 2.14(b)). Au terme de son mouvement d'ascension le long de la came 1, une aiguille est saisie au niveau du talon par la came de chute 2 qui l'oblige donc à redescendre. Lorsque l'on aura tricoté dans le sens gauche-droite comme sur les figures 2.14(a) et 2.14(b), il faudra revenir en sens inverse. Le plan des cames doit donc être conçu de telle façon que l'on puisse indifféremment tricoter dans un sens ou dans l'autre. On adjoindra alors au système une came de chute supplémentaire symétrique de celle déjà existante par rapport à la came d'ascension (figure 2.15). Ces trois plaques sont portées par une plaque à cames, elle-même solidaire du chariot. La position en hauteur de la came de chute par rapport à l'aiguille déterminera la grandeur (hauteur ou serre) de maille. Autrement dit, si la came de chute est réglée bas, les boucles de mailles seront longues, au contraire si elle est réglée haut, les boucles seront courtes.

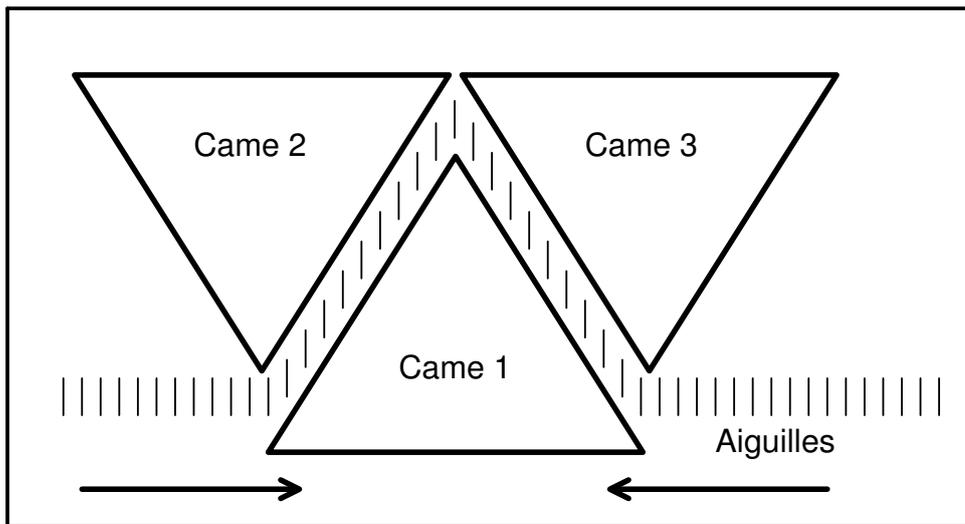


FIG. I.2.15 – Plaque à cames complète

La charge, obtenue par ascension incomplète de l'aiguille nécessite un aménagement spécial de la came d'ascension. Nous nous souvenons que la formation d'une maille chargée fait appel à deux passages de chariot. Au cours du premier passage du chariot (Sens *I* de la figure 2.16), la came d'ascension est abaissée de manière à ne provoquer qu'une

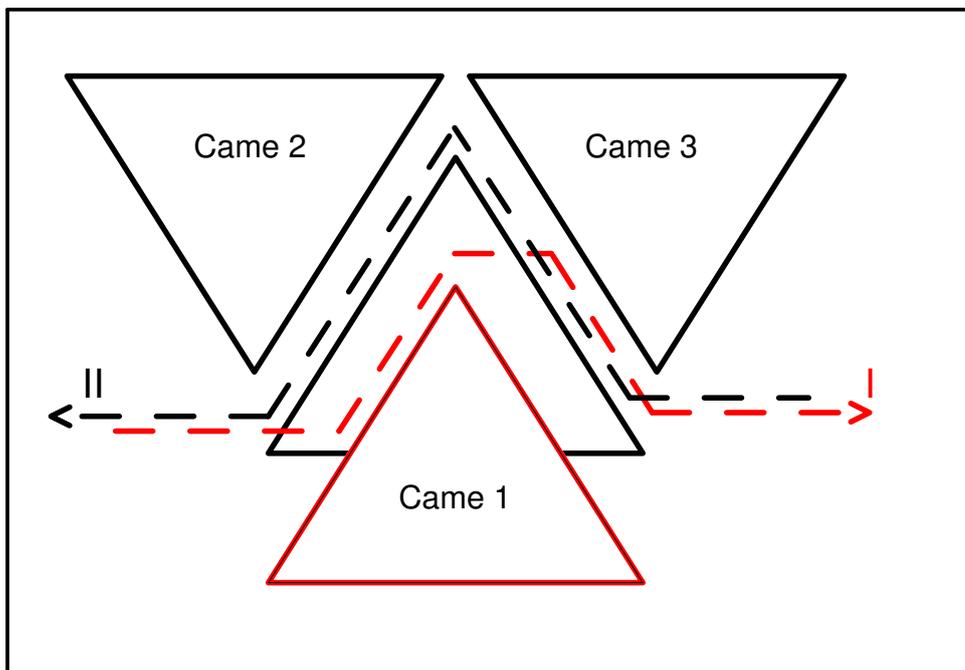


FIG. I.2.16 – Plaque à cames pour effectuer des charges

demi-ascension des aiguilles. Au cours du deuxième passage du chariot dans l'autre sens (sens *II*), la came 1 a repris sa position convenable pour effectuer un cycle normal de formation de la maille.

La distance entre deux aiguilles voisines détermine la jauge de la fonture. La jauge anglaise, qui est la plus fréquemment utilisée par les industriels, exprime le nombre d'aiguilles contenu sur un pouce anglais (soit 25,4mm). Il existe un ensemble de lois et règles qui permettent de préciser la dimension des mailles pour les tricots de base et en premier lieu le jersey. Elles ont été initialement élaborées par Doyle et Munden ([Doy53], [Mun59]) qui ont mis en évidence des relations entre le nombre de colonnes et de rangées de mailles au centimètre et la longueur de fil constituant une maille. Ces relations sont les suivantes :

$$C = \frac{K1}{l} \quad R = \frac{K2}{l} \quad \text{et} \quad CR = N = \frac{K1K2}{l^2} = \frac{K}{l^2}$$

où :

- l est la Longueur de Fil Absorbée (LFA) en cm dans une maille
- C est le nombre de colonnes de mailles par cm
- R est le nombre de rangées de mailles par cm
- N est la densité de mailles par cm^2
- $K1$, $K2$ et K étant des constantes déterminées expérimentalement qui dépendent de la matière textile tricotée et du type d'entrelacement.

Il est bien évident que $\frac{1}{C}$ et $\frac{1}{R}$ représentent respectivement la largeur et la hauteur d'une maille. La valeur l détermine la « serre » du tricot, c'est à dire la grandeur des mailles. La serre conditionne la compacité du tricot, si les boucles de mailles sont grandes, on dira que le tricot est lâche ; si elles sont petites, on dira que le tricot est serré. Ainsi définie, la LFA est indépendante de l'état de déformation du tricot et elle conditionne la serre du tricot à l'état relaxé.

Pour assurer la formation du tricot, le « tirage » est assuré par un peigne et des poids accrochés au bas du tricot (première rangée confectionnée) que nous réalisons. Supposons que le tricot soit libre dans les aiguilles et sans tension. Lors du mouvement d'ascension des aiguilles, les dernières mailles tenues dans les becs des aiguilles risqueraient de tomber

avec difficulté sur le corps de l'aiguille ou de rester sur le clapet ouvert (ce phénomène est dû aux forces de frottement agissant entre aiguille et fil). En conséquence, il pourrait en résulter une remontée du tricot lors de l'ascension. De plus, au moment de la chute des aiguilles, si les mailles étaient lâches, elles risqueraient de ne pas fermer le clapet ou d'être mal abattues ou encore d'être reprises par le bec des aiguilles. Le tirage a donc pour but d'exercer une tension sur les mailles tenues par les aiguilles pour assurer un abattage correct de l'ancienne maille sur la nouvelle et pour obvier aux inconvénients que nous venons d'énumérer.

Il est important de préciser que les métiers à tricoter ne sont pas toujours rectilignes, mais peuvent être également circulaires. L'étude du tricotage sur les métiers circulaires est facilitée par l'initiation sur métier rectiligne. En effet, les métiers rectilignes ont pratiquement tous leur équivalent en métier circulaire. Les aiguilles sont disposées sur des fontures circulaires. Ils produisent des tricots en forme de tubes, qui pourront ensuite être « coupés-cousus » pour en faire les articles souhaités. Au métier rectiligne simple fonture, correspond le métier circulaire simple cylindre, tandis qu'au métier rectiligne deux fontures correspond le métier circulaire deux fontures, calage côte (aiguilles disposées en quinconce) ou interlock (aiguilles face à face). L'une des fontures est identique à celle d'un métier simple fonture et porte également le nom de cylindre, l'autre fonture lui est orthogonale et porte le nom de plateau (2.17).

2.3 Les fils

Les matières des fils sont scindées en trois grands groupes : les matières naturelles, les matières artificielles et les matières synthétiques. Les matières textiles naturelles sont celles que l'on trouve sous forme de fibres (laine, coton, ...) ou de filament (soie) dans la nature.

Les matières artificielles sont fabriquées à partir de produits existant dans la nature (cellulose de bois, protéines naturelles, ...). Les polymères ou longues chaînes macromoléculaires sont déjà formées mais la présentation de la matière nécessite des transformations chimiques passagères ou non pour obtenir une matière textile.

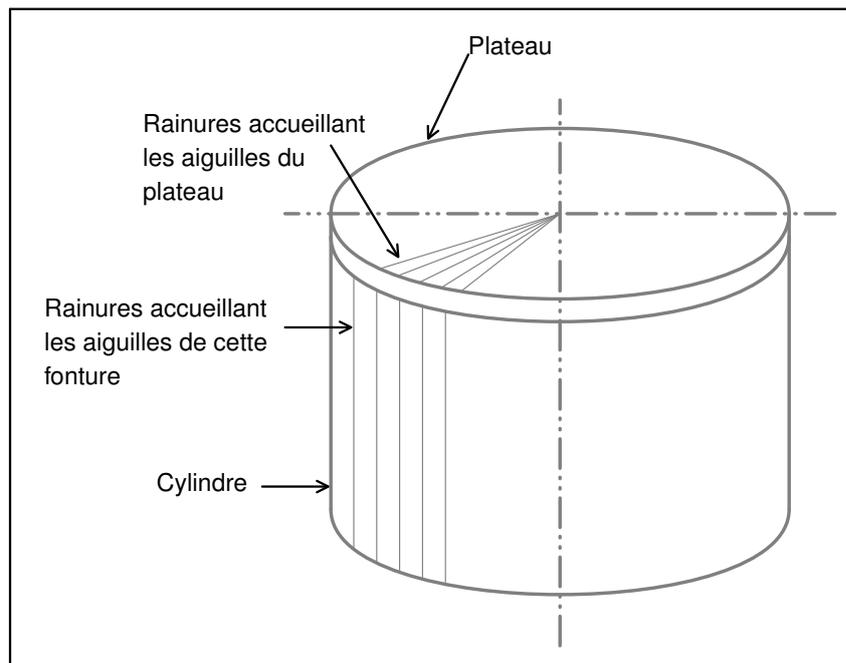


FIG. I.2.17 – Principe d'un métier cylindrique à 2 fontures

Les fibres synthétiques (polyamides, polyester, ...) sont fabriquées totalement par voie chimique à partir de dérivés du charbon ou du pétrole.

La désignation des fils est contenue dans la norme NF G 01.003. Il est important de distinguer avec quel type de fil on tricote, car ils ont des caractéristiques mécaniques très différentes. Voici les principaux fils utilisés :

- Le fil simple : fil sans torsion ou avec torsion dont on peut supprimer la torsion en une seule opération de détorsion.
- Le filé de fibres : fil composé de fibres discontinues assemblées, généralement par torsion.
- Le fil monofilament : fil constitué d'un seul filament. Ce filament doit être suffisamment résistant et flexible pour être tricoté.
- Le fil retors : fil composé de plusieurs fils de même longueur pouvant être rendus parallèles par une seule opération de détorsion.
- Le fil guipé : fil formé par l'enroulement en hélice d'un ou de deux fils autour d'un autre fil.

- Le fil texture : fil continu, avec ou sans élasticité, avec ou sans torsion, dont l’aspect gonflant résulte d’une ondulation ou frisure des filaments élémentaires.
- Le fil fantaisie : fil qui a été fabriqué délibérément pour qu’il diffère de façon significative, par son aspect, d’un fil classique.

L’industrie textile dispose donc d’un grand nombre de fils différents, utilisés pour des confections très variées. Pour obtenir cette variété de fil, les filateurs peuvent jouer sur de nombreux paramètres tels que :

- La matière première utilisée (coton, laine, nylon, . . .)
- L’importance de la torsion
- Le type de fil utilisé (fils retors, guipés, fantaisie, . . .)
- Le mélange de fils de couleurs et de compositions différentes
- La dimension du fil
- Les traitements additionnels appliqués au fil

Pour caractériser l’épaisseur (ou titre) du fil (qui est une donnée importante puisqu’elle va jouer notamment sur le type d’aiguilles que l’on pourra employer), il existe plusieurs conventions de mesure dont les deux principales sont :

- Le numéro métrique (NM) : longueur en kilomètres d’un kilogramme de fil.
- Le tex (recommandé par l’AFNOR) : poids en grammes d’un kilomètre de fil (le titre d’un fil de n NM sera de $\frac{1000}{n} \text{tex}$).

La résistance d’un matériau correspond à la force que l’on doit exercer sur celui-ci pour le rompre et s’exprime en gramme force. Mais la résistance d’un fil ne permet pas toujours de juger de sa solidité par rapport à d’autres fils puisque la grosseur ou titre du fil intervient. Aussi il est plus intéressant de calculer la « ténacité » du fil qui correspond à la résistance par unité de titre.

$$\text{Ténacité en gf/tex} = \frac{\text{résistance en gf}}{\text{titre en tex}}$$

Chapitre 3

Le schéma de liage

Sommaire

3.1	Les conventions de représentation graphique des éléments de base d'un tricot	33
3.2	L'utilisation de la norme pour définir les liages de base	36
3.2.1	Les tricots à base jersey	36
3.2.2	Les tricots à base de côte 1 et 1	40
3.2.3	Les tricots avec suppression de colonnes de mailles	42
3.2.4	Les tricots à mailles chargées	45
3.2.5	Le « spacer 3D »	47

3.1 Les conventions de représentation graphique des éléments de base d'un tricot

Nous avons vu au chapitre précédent, les techniques industrielles de tricotage. Il est nécessaire d'indiquer les conventions qui régissent la représentation graphique des tricots. Cette représentation montre schématiquement les mailles telles qu'elles apparaissent sur la machine (vue du dessus) au niveau de la formation d'une rangée. Sur la figure 3.1, nous voyons deux mailles *A* et *B* portées respectivement par une aiguille de la fonture avant

et une aiguille de la fonture arrière. Pour un observateur placé devant la machine, *A* est une maille endroit, tandis que *B* est une maille envers.

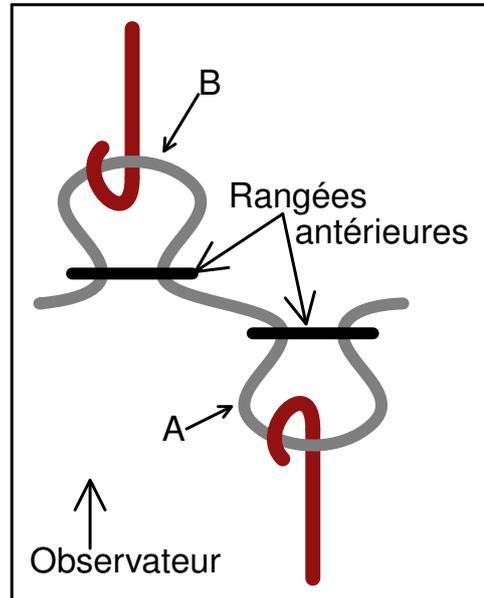


FIG. I.3.1 – Représentation schématique des mailles lors de leur formation

De la même manière, la figure 3.2, illustre l'apparition d'une boucle de charge sur une maille endroit (*C*) et d'une boucle de charge sur une maille envers (*D*).

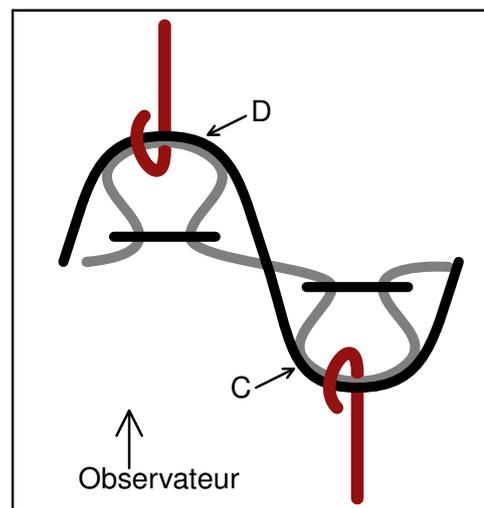


FIG. I.3.2 – Représentation schématique des boucles de charges lors de leur formation

Les mailles endroit et envers sont représentées par les symboles *A* et *B* de la figure 3.3. Les symboles *C* et *D* correspondent aux boucles de charge endroit et envers. Un

3.1. LES CONVENTIONS DE REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES ÉLÉMENTS DE BASE D'UN TRICOT

point représente une colonne de mailles. Les aiguilles inactives sont indiquées par des croix, comme l'illustre le symbole *E*. Ces symboles sont normalisés et décrits dans la norme française NF. G. 00.025 intitulée « Mode de représentation graphique du liage des fils dans un tricot à mailles cueillies ». Les professionnels de la maille appellent cette représentation le langage « vermicelle ».

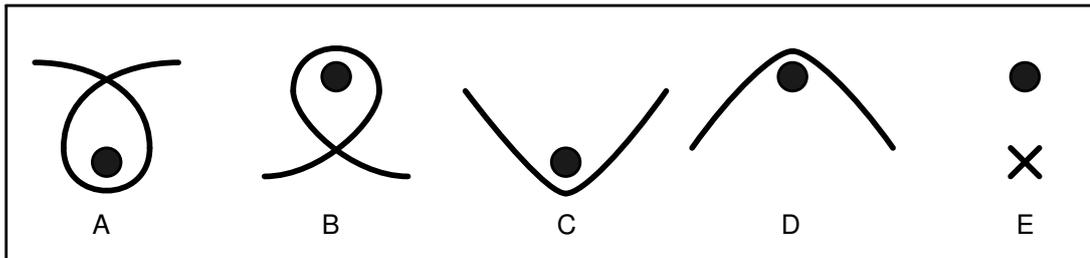


FIG. I.3.3 – Symboles de base du langage « vermicelle »

Il existe dans la pratique deux positionnements différents des fontures :

- Le calage interlock (ou jersey) : les deux fontures sont positionnées de telle façon que les aiguilles soient face à face.
- Le calage côte : les aiguilles des deux fontures sont en quinconce.

Pour représenter un tricot, les industriels utilisent des feuilles de papier normalisé (également norme NF. G. 00.025) qui sont des feuilles comportant des lignes de points

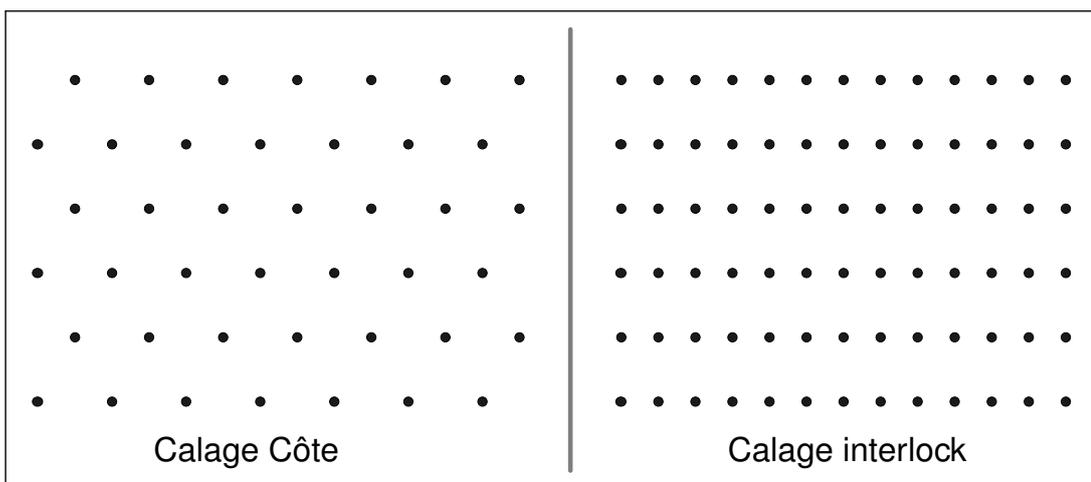


FIG. I.3.4 – Représentation du papier utilisé pour représenter les liages en calage côte ou interlock

disposées ou non en quinconce pour schématiser les tricots de base jersey ou côte (3.4).

Le vocabulaire utilisé pour désigner les modes de liage des fils dans un tricot (comme par exemple, le jersey, le point de rome, la côte 1 et 1 ...) fait également l'objet d'une norme française référencée N.F. G.00.028.

3.2 L'utilisation de la norme pour définir les liages de base

On désignera par le terme de liage l'entrelacement des mailles résultant du mode de fabrication d'un tricot. La connaissance de ces tricots de base et de leurs propriétés est nécessaire à la compréhension de tous les autres qui en quelque sorte en dérivent. Ainsi, lorsque nous représentons un tricot en langage vermicelle, nous représentons le trajet du fil dans ou entre les aiguilles qui sont symbolisées par des points. Le langage vermicelle a deux avantages majeurs : il permet de décrire n'importe quel tricot réalisable sur métier industriel et son expression, certes schématique, de la réalité de la fabrication permet d'appréhender de manière simplifiée la géométrie et la topologie du tricot qui sera généré.

3.2.1 Les tricots à base jersey

Le **jersey** est un tricot obtenu en tricotant sur une seule fonture dont toutes les aiguilles sont actives pendant toute la durée du tricotage. La représentation du jersey est donnée par la figure 3.5.

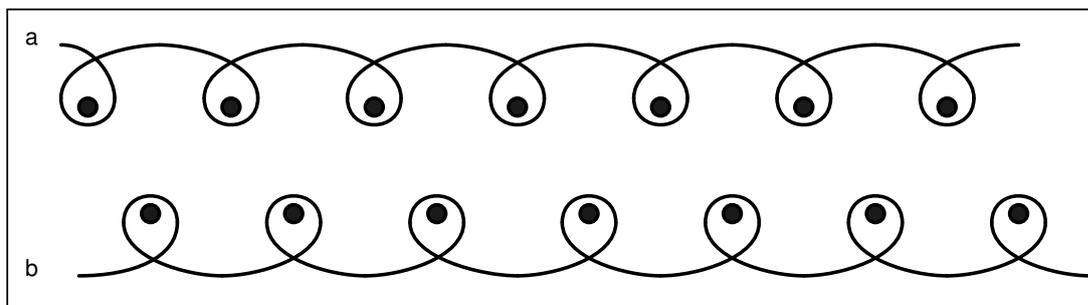


FIG. I.3.5 – Graphe de liage : jersey.

3.2. L'UTILISATION DE LA NORME POUR DÉFINIR LES LIAGES DE BASE

En *a*, le jersey est vu sur l'endroit (tricotage sur la fonture avant) tandis qu'en *b* il est vu sur l'envers (fonture arrière). Si on examine ce tricot (figure 3.6), nous remarquons qu'en tirant le début ou la fin du fil, les mailles se détricotent. Le jersey est donc démaillable dans les deux sens. Une autre caractéristique de ce tricot est son aptitude à se rouler. Il

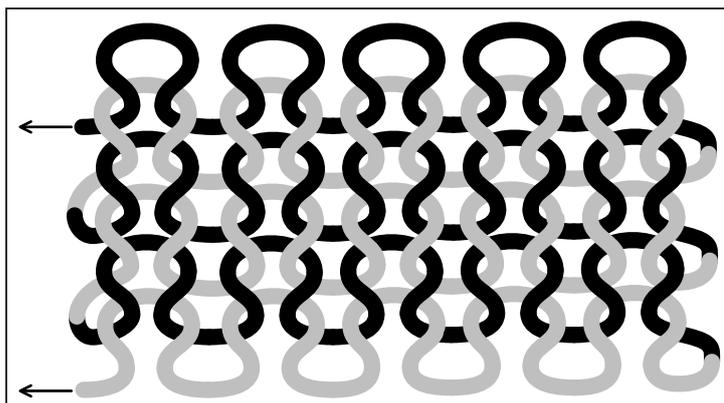


FIG. I.3.6 – Tricot jersey

s'enroule sur l'endroit dans le sens colonnes et sur l'envers dans le sens rangées.

Sur le tricot vu en coupe suivant le sens colonnes (figure 3.7), les pieds de la maille *M* sont disposés au dos de la maille *M1* tricotée auparavant. La tête de la maille est disposée au dos de la maille suivante *M2*. Nous observons donc que la tête, les pieds et les jambes d'une maille ne sont pas planes, au contraire le profil de la maille forme un arc qui tend

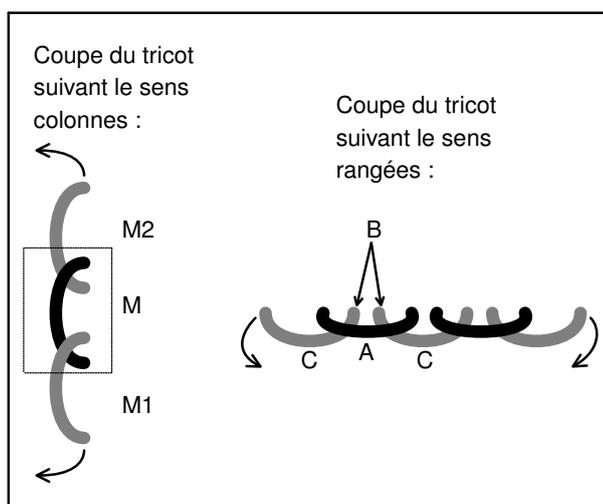


FIG. I.3.7 – Les deux coupes du jersey.

à se redresser sous l'effet de la réaction du fil. C'est pourquoi on constate une tendance au roulage de ce tricot suivant le sens des flèches, c'est à dire vers la face endroit.

Si on examine maintenant la coupe du tricot dans le sens rangées (figure 3.7), nous observons que la tête de la maille *A* repose sur les pieds de la maille *B* suivante. La maille *A* ainsi que les entremailles *C* sont en forme d'arc dont la concavité est tournée vers l'endroit. C'est pourquoi ces arcs auront tendance à se redresser et de ce fait provoquer un roulage sur l'envers. La figure 3.8 est une photo d'un tricot réel en jersey, réalisé à l'IFTH. Pour les besoins de la formation, ce tricot est divisé selon un axe vertical, un côté montrant la face envers d'un liage tandis que l'autre côté du tricot correspond à la face endroit de ce même liage.

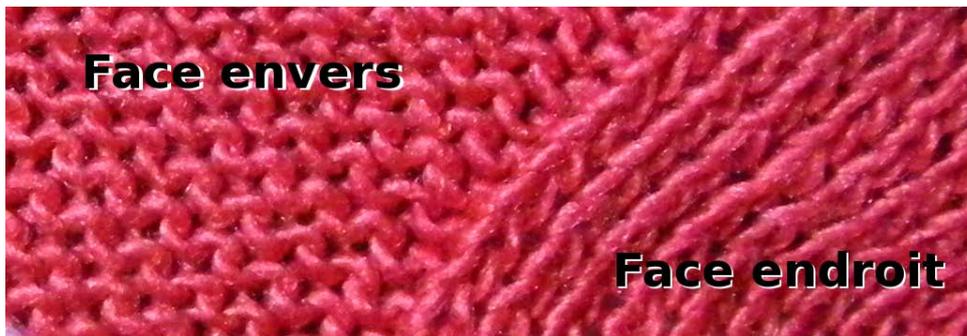


FIG. I.3.8 – Photo d'un tricot jersey

Un cas particulier du tricot à base jersey sur métier rectiligne est le **jersey tubulaire** : le but est d'obtenir un tube de tricot jersey. Pour cela, on tricote alternativement sur chaque fonture avec le même fil ; il y aura donc liaison entre les colonnes de mailles des aiguilles de chaque extrémité de rangées (figure 3.9). Lorsque, comme dans ce cas, un motif nécessite des opérations distinctes sur plusieurs rangées de mailles, on utilise un graphe doté d'autant de lignes (évolutions) que de passages de chariot nécessaires à la réalisation du motif. Il est à noter que le sens de lecture n'est pas le sens intuitif, car il faut lire les lignes du motif du bas vers le haut. Ce sens de lecture est fidèle au sens temporel de réalisation des rangées de mailles ; les premières rangées tricotées se trouvant effectivement en bas du tricot sur le métier.

Lors d'un passage droite-gauche du chariot, on tricote uniquement sur la fonture avant puis, lors du passage gauche-droite on tricote sur la fonture arrière uniquement. On re-

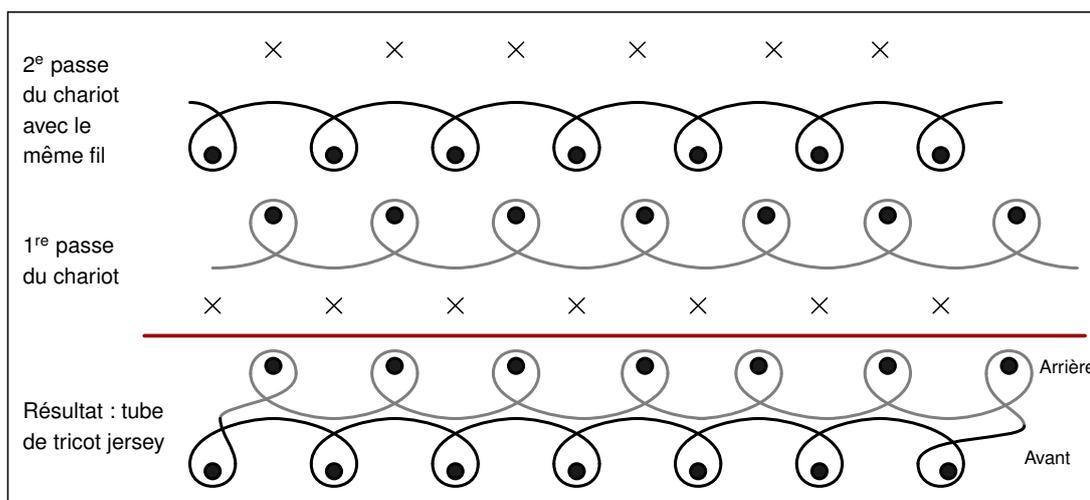


FIG. I.3.9 – Graphe de liage du jersey tubulaire en calage côte

produit ensuite ce cycle autant de fois que souhaité pour obtenir le tube de tricot de la taille voulue (3.10).

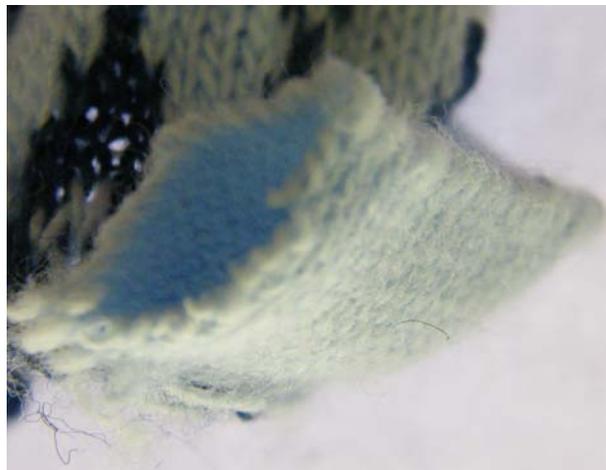


FIG. I.3.10 – Photo d'un échantillon de tricot jersey tubulaire

Une application importante du jersey tubulaire est son utilisation dans la formation du début d'un article. Pour démarrer un tricot sur des aiguilles dépourvues de mailles, on forme une rangée de mailles « artificielles » appelée « réseau » sur la base d'un tricotage en côte 1 et 1. La ou les rangées de tubulaire limitent la déformabilité du réseau en lui conférant une certaine fermeté.

3.2.2 Les tricots à base de côte 1 et 1

Le tricot de base sur un métier rectiligne à deux fontures est le tricot **côte 1 et 1**, il a été décrit dans le chapitre précédent. Le liage de la figure 3.11 montre le schéma vermicelle d'une rangée de mailles en côte 1 et 1. Si on examine un tricot côte 1 et 1 vu en coupe

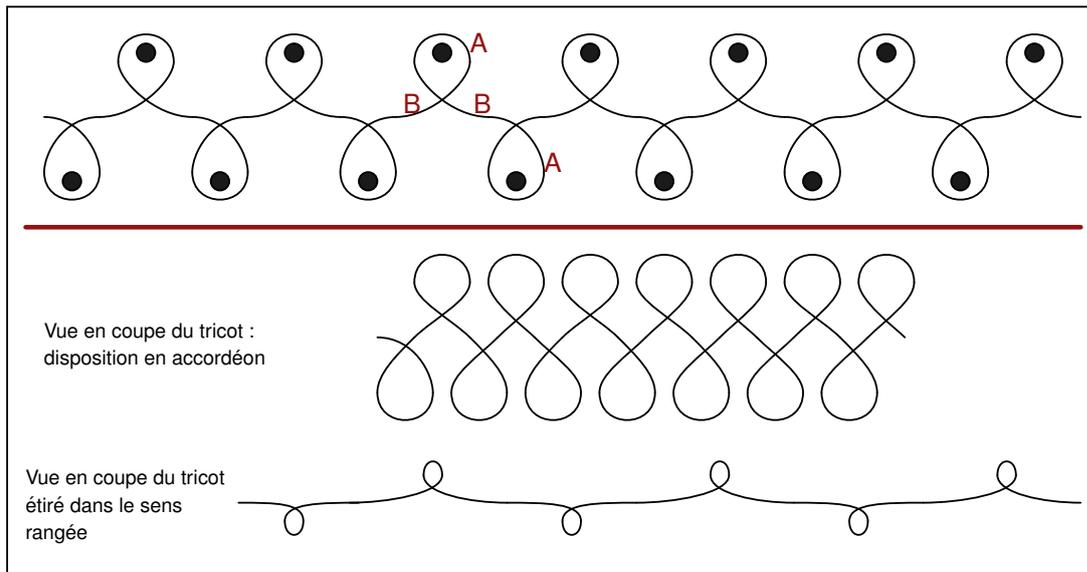


FIG. I.3.11 – Graphe de liage d'une côte 1 et 1 en calage côte

suivant une rangée, on observe un resserrement transversal des mailles qui aboutit à une disposition en « accordéon » des colonnes de mailles. Ce tricot est très extensible suivant le sens des rangées : une sollicitation dans ce sens déforme les mailles A et allonge les entremailles B et les place dans le même plan. La côte 1 et 1 entre dans la fabrication de nombreux articles vestimentaires notamment dans les bandes de garnitures (extrémité du tricot, de structure différente au niveau des manches notamment) nécessaires à leurs finitions. La photo de la figure 3.12 ne présente qu'une seule face car le tricot côte 1 et 1 est réversible.

La figure 3.13 illustre le tricot **interlock 1 et 1** qui forme deux tricots réversibles en cote 1 et 1. Ces deux tricots sont assortis de sorte que la colonne de mailles envers d'un côté est contre la colonne de mailles envers du second tricot (figure 3.14). Cette disposition fait de l'interlock un tricot indémaillable.

De plus, la mise dos à dos des deux rangées de côte 1 et 1 inhibe la disposition

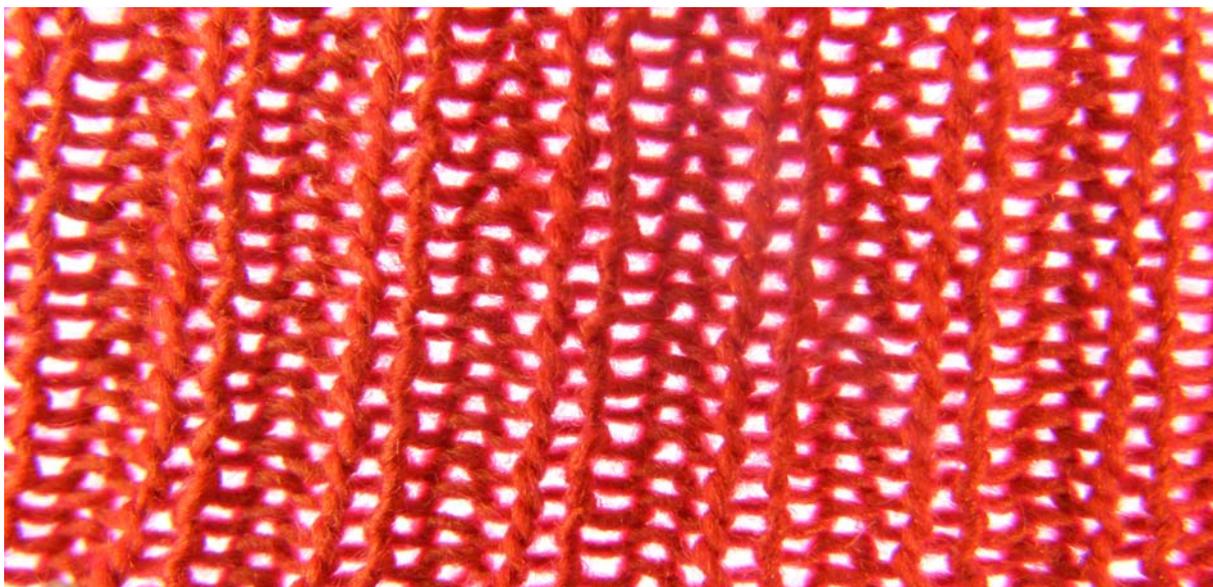


FIG. I.3.12 – Photo d'un échantillon de tricot côte 1 et 1

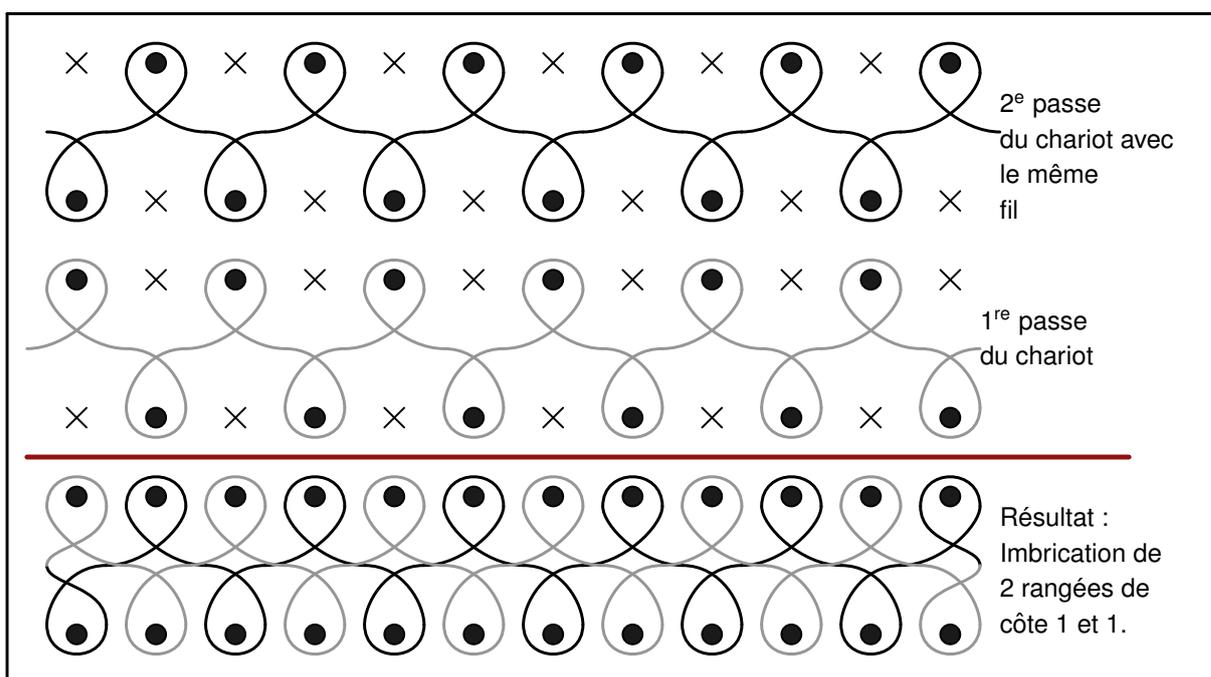


FIG. I.3.13 – Graphe de liage d'un tricot interlock 1 et 1 en calage jersey

« accordéon » présente dans le tricot côte 1 et 1; chaque rangée annulant l'action de son antagoniste. De ce fait le tricot interlock possède une grande stabilité dimensionnelle (extensibilité basse) qui lui vaut son utilisation dans la fabrication des sous-vêtements

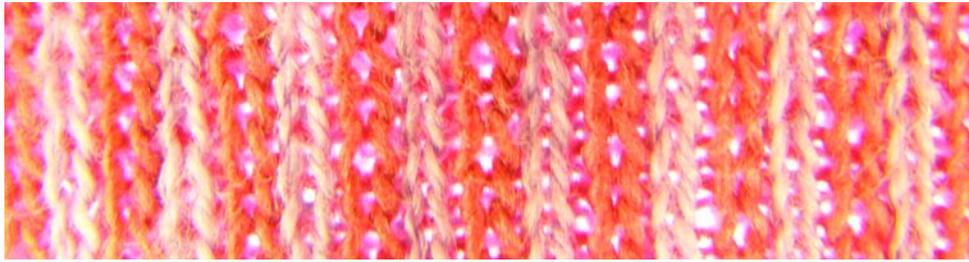


FIG. I.3.14 – Photo d'un échantillon de tricot Interlock 1 et 1

masculins, des maillots de corps, les vêtements de sport, mais aussi dans les textiles techniques tels les supports d'enduction, les orthèses, certaines prothèses ...

3.2.3 Les tricots avec suppression de colonnes de mailles

La suppression d'une colonne de mailles dans un tricot correspond, sur la machine, à une suppression d'aiguille dans la fonture. Une aiguille supprimée le sera donc du début à la fin du tricotage. Deux possibilités de suppression d'aiguilles existent :

- sur l'une des deux fontures
- sur les deux fontures

Les tricots **Richelieu** sont des tricots obtenus par la suppression régulière de colonnes de mailles sur une face du tricot. La figure 3.15 représente une **côte Richelieu 4/6** (quatre mailles endroit pour six mailles envers). Ce tricot est donc constitué, dans le sens

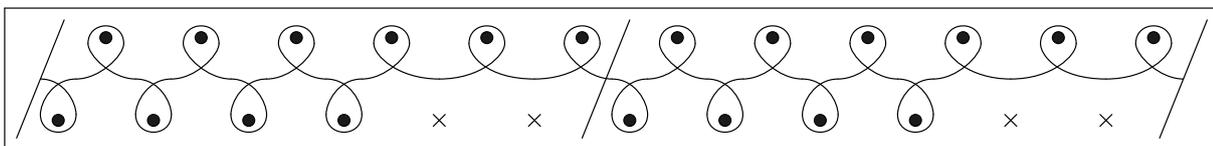


FIG. I.3.15 – Graphe de liage d'une côte Richelieu 4/6 en calage côte

colonnes, de bandes de tricot de base côtes et de base jersey (3.16). Les bandes de jersey auront tendance (nous avons étudié précédemment le comportement du jersey) à rouler sur leur envers dans le sens rangées et à remonter sous forme de bourrelets dans le sens colonnes. Ce comportement du jersey rapproche les bandes de côte 1 et 1 avec marquage d'un creux à l'endroit où les colonnes de mailles ont été supprimées. Les tricots Richelieu



FIG. I.3.16 – Photo d'un échantillon de tricot côte Richelieu 4/6

sont couramment utilisés dans la confection des sous-vêtements et des articles chaussants.

Les tricots **côte Derby** sont issus de la suppression d'aiguilles sur les deux fontures : il y a donc une alternance de bandes de jersey endroit avec des bandes de jersey envers.

La figure 3.17 illustre une **côte Derby 4 et 2** ; quatre mailles endroit sont suivies de

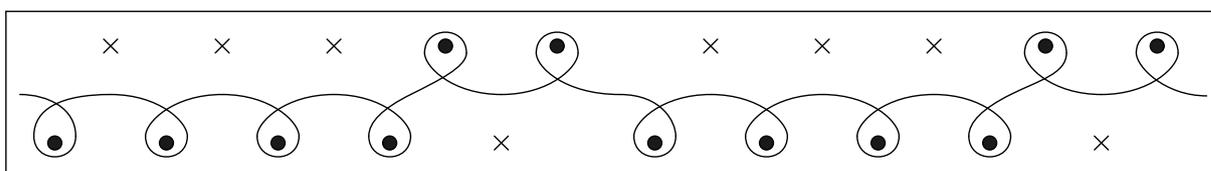


FIG. I.3.17 – Graphe de liage de la côte derby 4 et 2 en calage côte

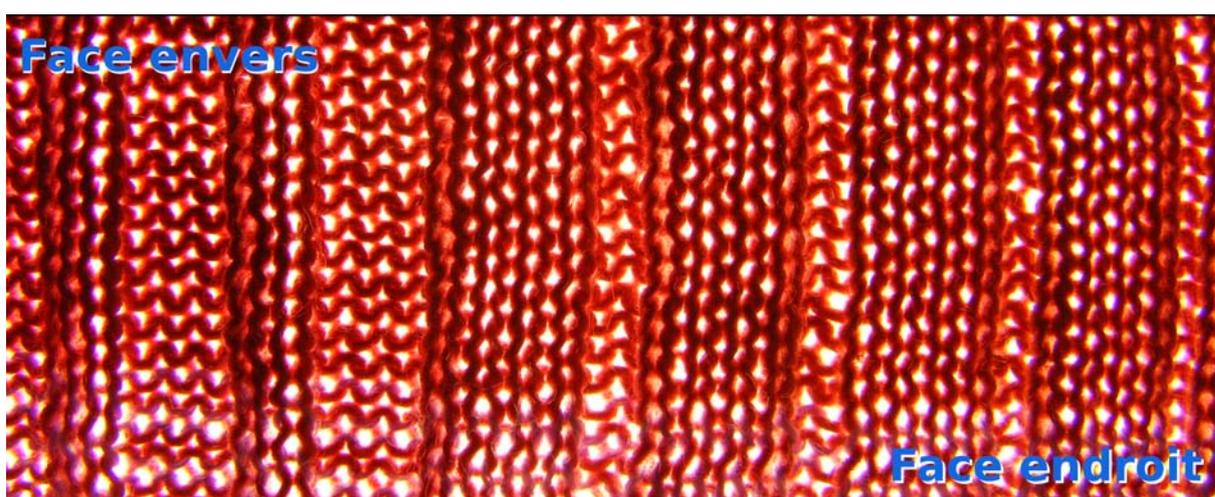


FIG. I.3.18 – Photo d'un échantillon de tricot Côte Derby 4 et 2

deux mailles envers (voir la photo de la figure 3.18).

Les tricots en côte Derby sont très utilisés dans la fabrication de chaussettes. Un cas particulier de ces tricots et très répandu dans la bonneterie est la côte 2 et 2. Cette dernière est obtenue en tricotant deux mailles sur la fonture avant suivies de deux mailles sur la fonture arrière. Les bandes de jersey ont tendance, nous l'avons expliqué précédemment, à rouler et donc à accentuer l'effet « accordéon » présent dans la côte 1 et 1. C'est pourquoi le tricot côte 2 et 2 est plus extensible que la côte 1 et 1.

Comme nous l'avons vu précédemment il est possible d'ajouter un fil de trame au tricot pour lui conférer plus ou moins d'élasticité. La figure 3.19 indique le graphe de liage de la **côte 1 et 1 tramée** que nous avons illustrée au chapitre précédent.

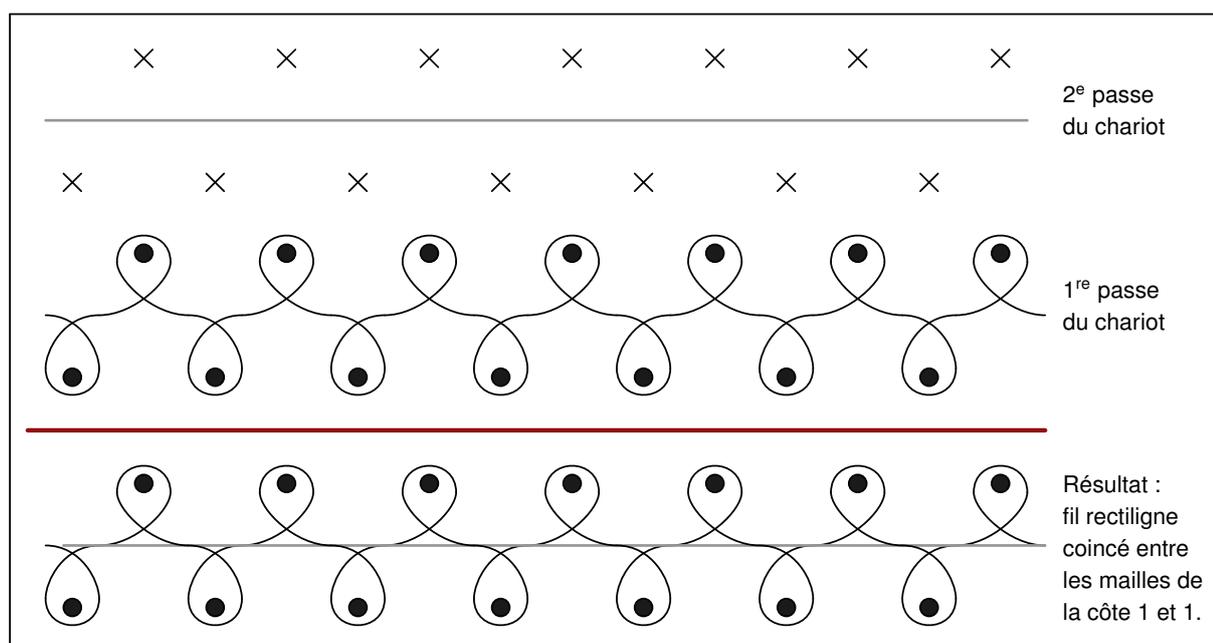


FIG. I.3.19 – Graphe de liage de la côte 1 et 1 tramée

On s'aperçoit bien qu'en tricotant simultanément ou alternativement sur chaque fonture comportant une garniture complète ou non d'aiguilles, on va déjà pouvoir réaliser de nombreux échantillons. Toutes les possibilités de tricot n'ont pourtant pas encore été vues puisque nous n'avons pas encore utilisé les charges.

3.2.4 Les tricots à mailles chargées

La figure 3.20 indique la représentation de la **côte anglaise**. Sur ce liage, on constate que toutes les mailles de chaque rangée (endroit et envers) seront doublées d'une boucle de charge. La boucle de charge n'est généralement pas apparente sur la face où elle vient d'être réalisée. Elle est cachée par la tête de la maille qu'elle vient doubler (figure 3.21).

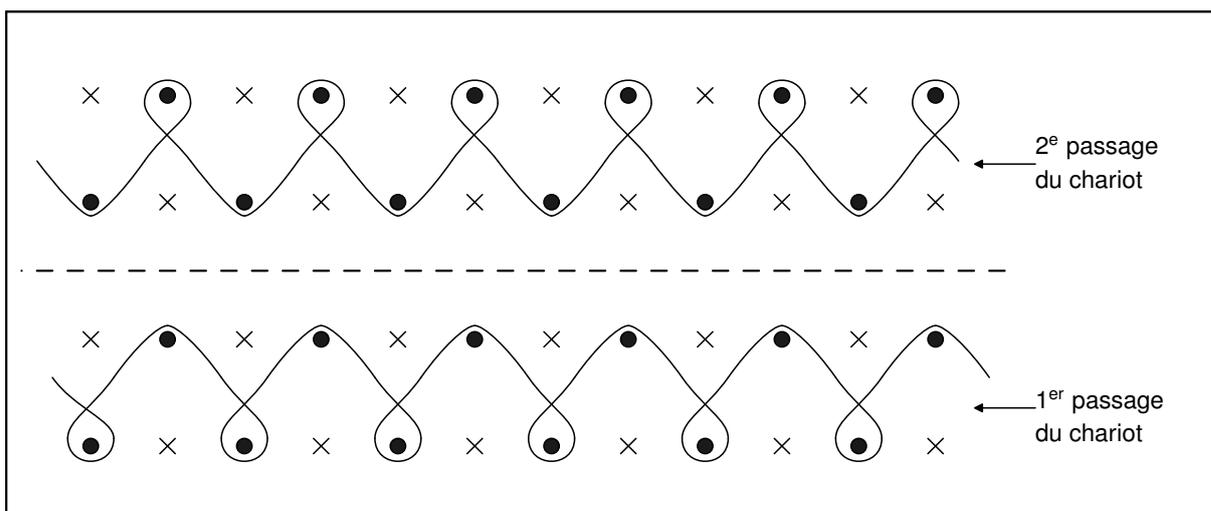


FIG. I.3.20 – Graphe de liage de la côte anglaise en calage côte

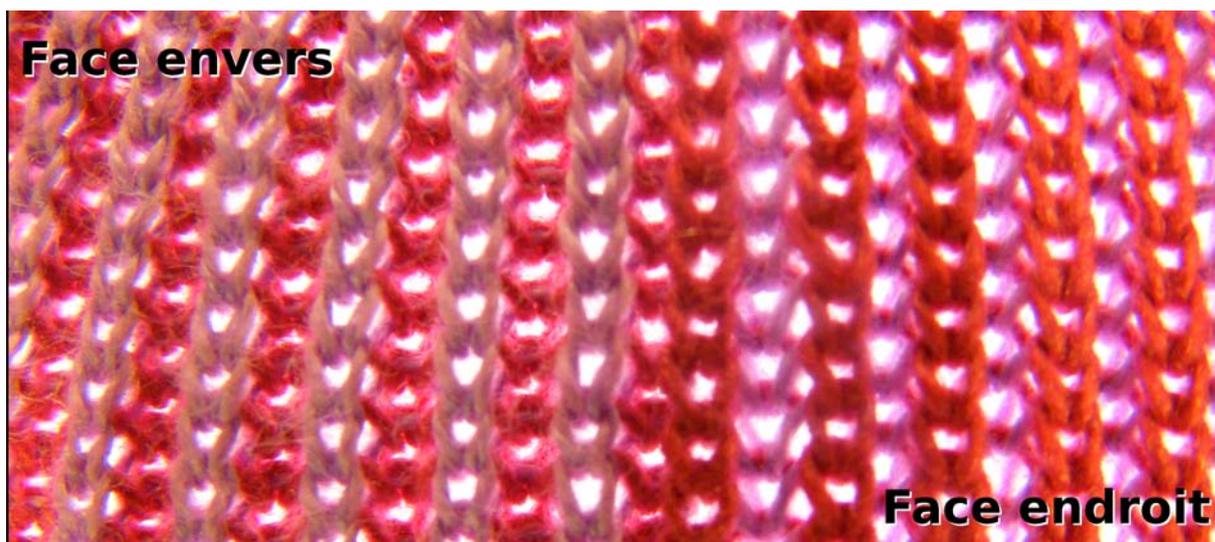


FIG. I.3.21 – Photo d'un échantillon de tricot côte anglaise

L'association d'une rangée de côte 1 et 1 et d'une des deux rangées de la côte anglaise

constitue la **côte perlée** (figure 3.22). Au cours de chaque aller-retour du chariot, on tricote deux mailles successives sur la fonture avant alors que sur la fonture arrière on réalise une maille doublée d'une boucle de charge. Quand on tricote la rangée *b*, on allonge

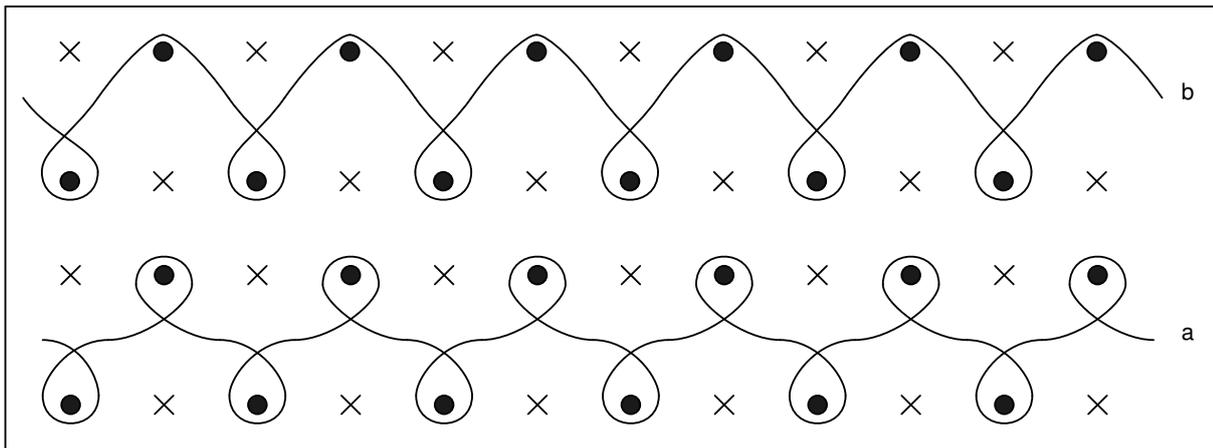


FIG. I.3.22 – Graphe de liage de la côte perlée en calage côte

les mailles de la fonture arrière au détriment de celles de la fonture avant tricotées en *a*. Au repos, les mailles envers allongées tendent à reprendre leur état initial, c'est à dire à se rétracter en hauteur ; les mailles endroit de la même rangée sont très petites car elles ont donné leur fil pour favoriser l'allongement des mailles arrières (figure 3.23).



FIG. I.3.23 – Photo d'un échantillon de tricot Côte perlée

Elles varieront peu en dimension. La côte perlée et la côte anglaise sont très utilisées dans la fabrication de pulls, vestes et articles pour les sports d'hiver.

3.2.5 Le « spacer 3D »

Les textiles 3D ou structures textiles tridimensionnelles sont constitués de fibres discontinues ou de fils continus, disposés dans les trois directions de l'espace. Une très récente innovation dans ce domaine est le « spacer 3D ». Le principe de fonctionnement de ce spacer 3D est de relier deux tricots indépendants par des entretoises en monofilament (type fil de pêche comme sur la photo de la figure 3.25). Le motif vermicelle de ce type de tricot est constitué de trois évolutions : deux rangées de jersey (ou dérivé de jersey sur une fonture) indépendantes séparées par une rangée de fil de charge qui constituera l'entretoise (figure 3.24).

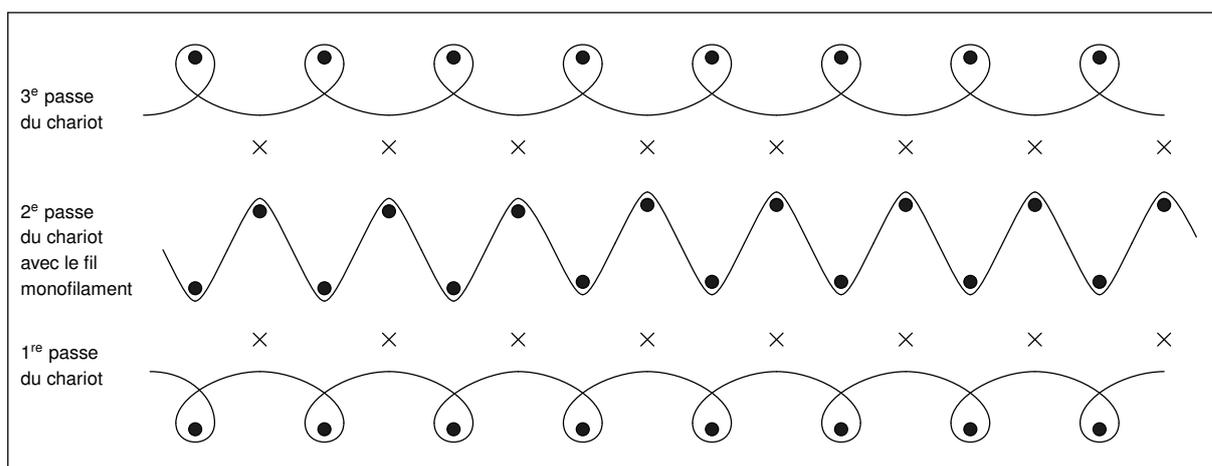


FIG. I.3.24 – Graphe de liage d'un tricot issu du spacer 3D

Ces tricots sont destinés, notamment, à remplacer les mousses non recyclables des sièges de divers secteurs industriels tels que l'automobile, le cinéma, l'aviation ...). Ils ont en effet vocation à être aussi épais et confortables qu'une mousse tout en étant plus simples à réaliser, plus écologiques et ayant une durée de vie bien supérieure.



FIG. I.3.25 – Photo d'un échantillon de tricot issu du spacer 3D

Chapitre 4

Formalisation du savoir-faire des tricoteurs

Sommaire

4.1 L'extraction de connaissances	49
4.2 La formalisation des savoirs et savoir-faire de nos partenaires de l'IFTH	51

4.1 L'extraction de connaissances

L'acquisition (ou extraction) des connaissances auprès de nos partenaires de l'IFTH fut une des difficultés majeures lors de la conception de notre moteur topologique ; comment fournir un outil de modélisation de tricot lorsqu'on ignore tout de ses méthodes de fabrication et de la géométrie qui en découle.

L'acquisition des connaissances a constitué la première phase de mon travail de thèse, dans la mesure où notre objectif de conception d'un outil C.A.O. pour la maille permet d'assister un utilisateur dans une tâche complexe et nécessitant des savoir-faire. La difficulté est donc de rendre explicite des savoir-faire et ensuite de produire des formules rendant compte de ces savoirs. L'extraction des connaissances métiers repose principalement sur une appropriation des méthodes et des informations manipulées par les experts

du domaine.

Le transfert de connaissances d'experts s'avère bien souvent empirique et c'est ce qui rend difficile son automatisation [KD91]. En effet, ce transfert d'expertise vise à formuler les connaissances de l'expert, ainsi que celles contenues dans les documents et/ou manuels qu'il utilise [Aus89] [AG05]. L'acquisition des connaissances a d'abord été perçue comme une activité d'accès à quelque-chose de préexistant puis de transcription dans un formalisme donné. Ainsi, l'expert du domaine possède une connaissance plus ou moins explicite, qu'il sait plus ou moins exprimer et expliquer, qu'il s'agit d'extraire, pour ensuite la transcrire dans un programme, selon un formalisme plus ou moins universel : règles de productions, objets, logique . . . [HRWL83].

Il y a deux acteurs principaux du processus d'acquisition des connaissances ([DCG+74]) :

- **l'expert** : c'est le spécialiste du domaine qui possède les connaissances hétérogènes que l'on cherche à modéliser ainsi que l'expérience et le savoir-faire.
- **l'informaticien ou le cogniticien** : il s'agit du « modélisateur » des connaissances, il recueille, dissèque et formalise les connaissances de l'expert.

Les méthodes d'acquisition des connaissances peuvent être hiérarchiquement classées ainsi :

- le cogniticien pratique lui-même le métier de l'expert qu'il essaie de modéliser.
- le cogniticien suit l'expert dans sa pratique et observe ce dernier dans le cadre de sa fonction afin de capter les connaissances tacites de l'expert.
- le cogniticien interviewe directement l'expert.
- le cogniticien dépose un questionnaire à l'expert qui répondra quand il disposera de temps.
- le cogniticien propose à l'expert des tests et/ou des simulations dans le but de déduire ses connaissances tacites.
- le cogniticien mène une étude bibliographique.
- le cogniticien déduit les connaissances tacites des données recueillies ou déduites par l'expert, dans ce cas le cogniticien doit être un expert du domaine étudié.

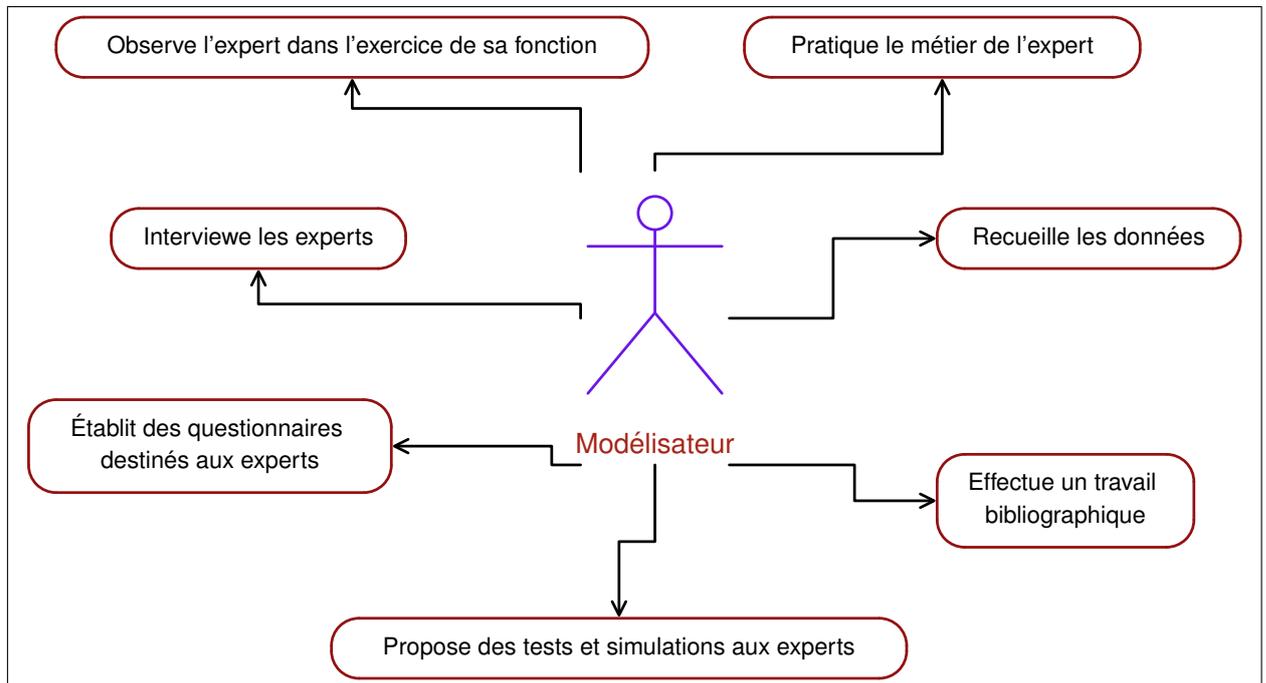


FIG. I.4.1 – Méthodes d'acquisition de connaissances

4.2 La formalisation des savoirs et savoir-faire de nos partenaires de l'IFTH

Dans le cadre de ma thèse, l'acquisition des connaissances industrielles en matière de bonneterie s'est faite grâce à plusieurs visites chez nos partenaires de l'IFTH ; ces visites m'ont permis de connaître leur environnement de travail. Tout d'abord, ces professionnels de la maille m'ont enseigné les bases des techniques de fabrication de tricots industriels que j'ai présentées dans les chapitres précédents. Cette étape ne fût parsemée d'aucune embûche, excepté peut être mon novisme en la matière, car une des vocations de l'IFTH est d'organiser des formations aux techniques de bonneterie pour les entreprises du secteur et le centre dispose donc de supports dédiés à la formation, ainsi que d'excellents pédagogues.

La suite fût plus laborieuse, car l'objectif n'est pas de modéliser le travail des experts, comme classiquement dans le domaine de l'acquisition de connaissances, mais de formaliser des règles visant à définir la topologie et la géométrie des mailles d'une étoffe à partir de son schéma de liage. En effet, notre but étant de parvenir à un logiciel de prototypage virtuel, il faut donc simuler l'action des métiers à tricoter et ainsi être capable d'anticiper

la topologie et la géométrie du tricot à générer. La simulation physique du processus de tricotage, de par sa complexité, nous a semblé très délicate. Nous nous sommes donc tournés vers une voie phénoménologique de la simulation du tricotage pour laquelle les connaissances des experts de la maille étaient indispensables.

De ce fait, cette étape a demandé une phase conséquente d'extraction de connaissances auprès de nos experts car il n'existe pas de règle établie permettant de déterminer la forme (rapport hauteur-largeur) des mailles composant le tricot. Les professionnels du tricot avaient une connaissance, certes très pointue, mais empirique du résultat *a priori* de la genèse d'un tricot à partir de son motif. Il y a donc eu un travail important de formalisation du savoir-faire de nos partenaires.

Mon processus de développement fût itératif (figure 4.2) et incrémental, chaque itération de mon travail comportant les activités suivantes : spécification, analyse, conception, implémentation, tests.

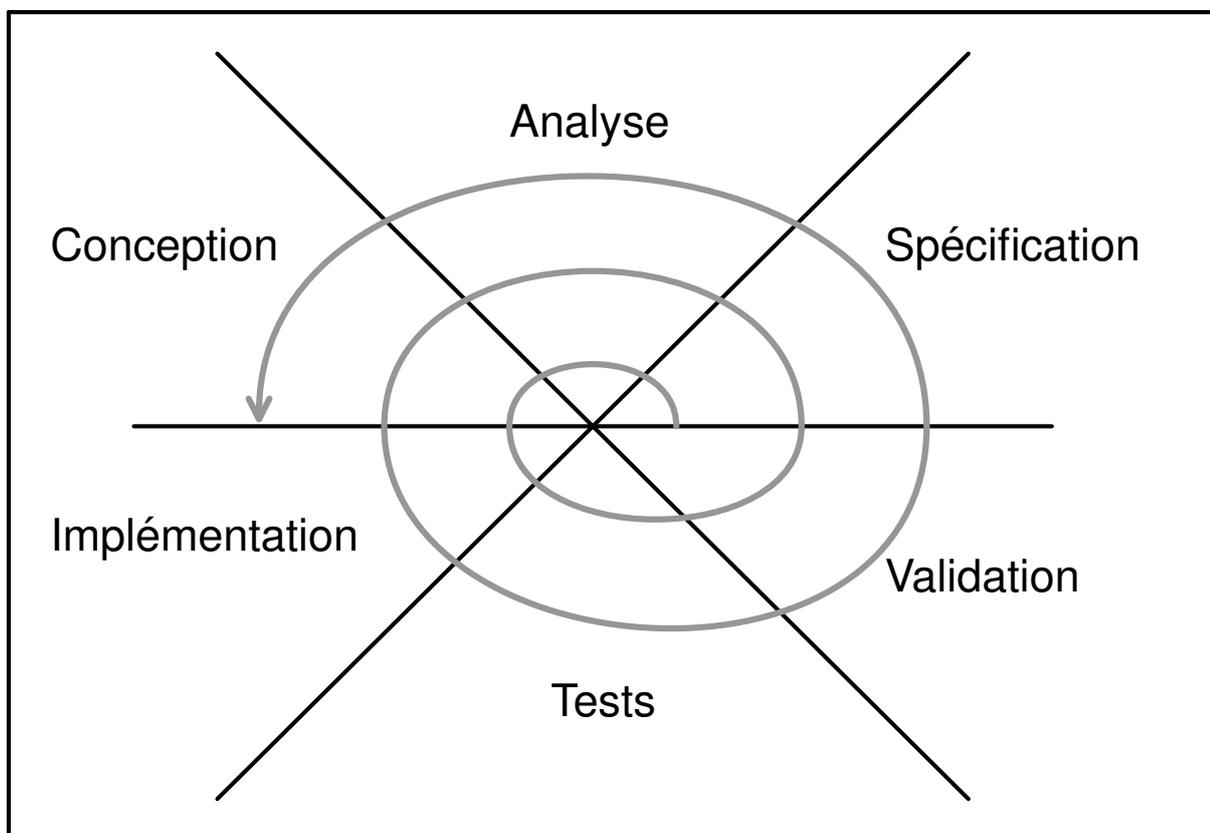


FIG. I.4.2 – Le processus de développement en spirale dit itératif

Cette démarche s'imposait d'elle même dans la mesure où, s'agissant d'un travail de recherche, le but à atteindre était très ouvert et évolutif : dans un premier temps, l'objectif était de fournir un moteur topologique capable de générer la topologie des liages de base, afin de pouvoir, grâce à une étape d'animation, simuler la relaxation du tricot, en cours de réalisation. Cependant, à l'issue des premières itérations de notre logiciel qui fournissait la modélisation topologique des liages de base simples, nos partenaires de l'IFTH ont identifié de nouveaux potentiels et exprimé la volonté de pouvoir modéliser des modèles plus complexes.

L'ambition concernant la topologie fût revue à la hausse, le nombre de cas à gérer fût augmenté considérablement et mit en exergue les limites des premières itérations du logiciel lors des phases de tests notamment sur les liages plus complexes récemment ajoutés. Nous pouvions rencontrer deux types d'erreurs :

- les incohérences évidentes de la topologie décelables par un néophyte sans intervention de nos experts (figure 4.3(a))
- les incompréhensions du principe même de fabrication du tricot qui se manifestent insidieusement car la topologie générée semble cohérente au néophyte mais n'est finalement pas validée par l'expert (figure 4.3(b)).

Ce dernier type d'anomalie relève d'une incompréhension dans l'acquisition du savoir-faire des experts. Cependant, ces connaissances n'ayant jamais fait l'objet d'une formalisation explicite, nous avons appris à générer notre topologie uniquement en nous basant sur les cas que les professionnels du tricot nous ont « décortiqués » et recommandés de tester pendant la phase de validation de notre application. Il est à noter que nous n'avons pas disposé dès le début d'une liste de liages à tester ; hors une règle de traitement valable pour N liages s'est parfois avérée ne plus l'être à l'ajout d'un liage dont l'obtention de la topologie ne répond pas à la même logique.

Par exemple, une des premières règles que nous avons établies, était qu'il y avait allongement de toute maille qui était doublée par une boucle de charge. Avec le peu de premiers cas de liages à tester initialement à notre disposition, cette règle semblait tout à fait pertinente à nos yeux et très cohérente par rapport à la méthode de fabrication d'une

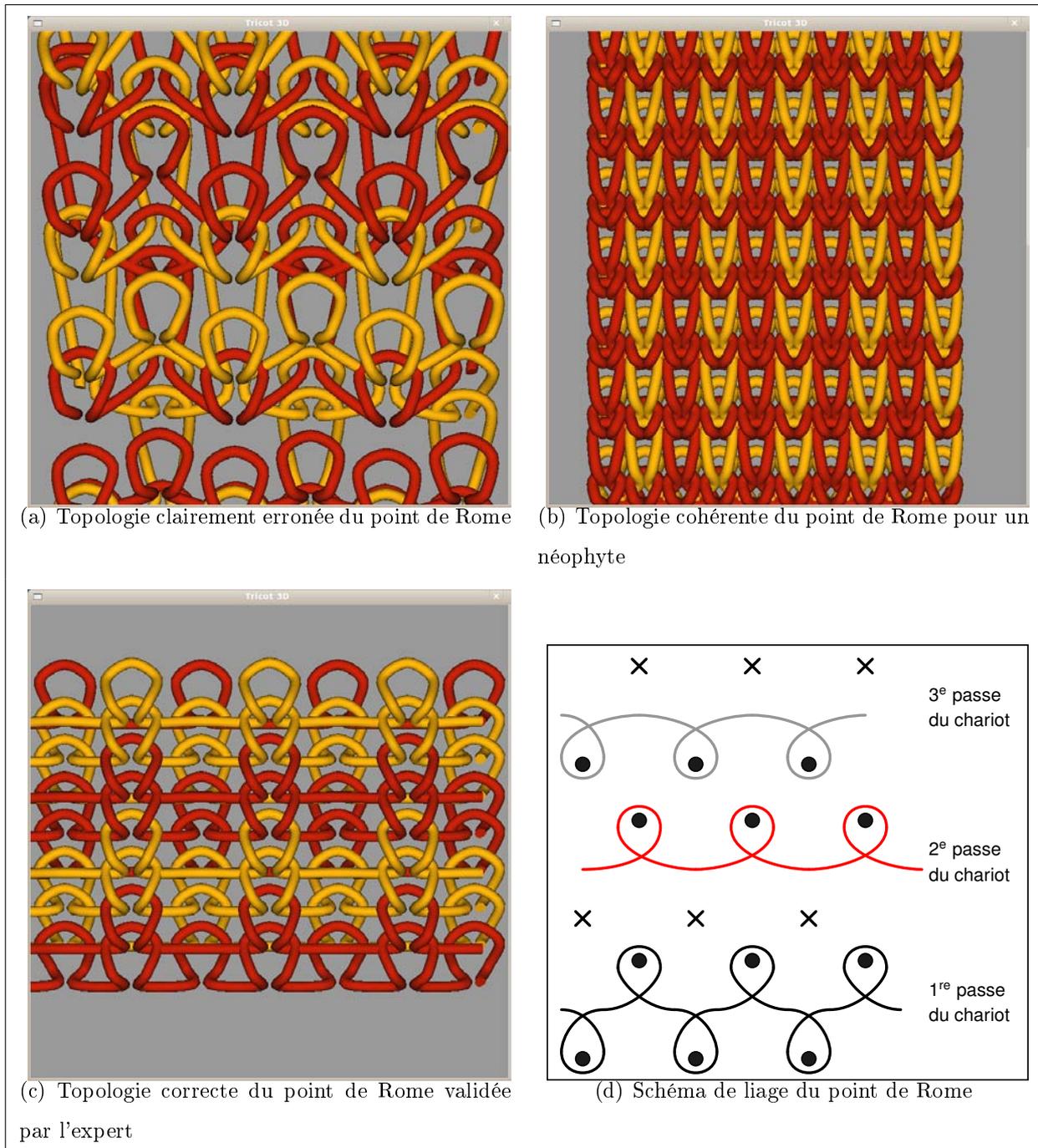


FIG. I.4.3 – Topologie obtenue par les différentes itérations du logiciel pour un même liage

maille chargée. Cependant, elle ne s'avéra pas valable et nous l'avons compris ensuite en observant de nouveaux liages plus complexes, munis d'explications supplémentaires.

Chaque itération de notre travail est née de l'apparition de nouveaux cas à modéliser, chacun d'entre nous pensant qu'il s'agissait des derniers ; nous les « modélisateurs », car

nous souhaitions disposer d'une liste exhaustive de liages à tester (ce qui est impossible car la liste est infinie) et nos partenaires pensant être parvenus à transmettre leur savoir-faire.

Il faut donc insister sur le fait qu'à chaque itération de notre logiciel, il m'a fallu, grâce au *feed-back* de nos partenaires, comprendre les incohérences identifiées, trouver une nouvelle règle visant à parvenir à la topologie correcte quel que soit le liage, implémenter ces nouvelles règles de traitement et tester l'ensemble des liages à notre disposition pour vérifier que nos récents apports ont été fructueux pour les nouveaux liages sans provoquer de régression pour les anciens cas. Le prototype logiciel actualisé était ensuite transmis à nos partenaires pour validation avec des rencontres de travail autour des résultats de cette validation. On compte actuellement une dizaine d'itérations de notre logiciel.

Deuxième partie

Logiciel de prototypage virtuel

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1 Enjeux à long terme	58
1.2 Enjeux de la thèse	59
1.3 Présentation du logiciel	60

1.1 Enjeux à long terme

Le but que nous souhaitons atteindre, à terme, est d'être capables de manipuler des « étoffes numériques » réalistes tant visuellement que dans leur comportement physique. L'ambition affichée n'est pas des moindres et, concrétisée, elle sera essentielle pour la filière textile et son développement. La perspective du maniement de ces étoffes virtuelles laisse envisager de nombreuses applications logicielles telles que des outils de formations réalistes, ou encore la manipulation de prototypes virtuels afin de tester leur apparence (dans le cas de tricots destinés à l'industrie de la mode) ou bien leur comportement physique (dans le cas des textiles à usage technique). À plus long terme, on peut même envisager des défilés virtuels, des cabines d'essayage virtuelles rendant possible la fabrication sur mesure « automatisée ». Ces applications révolutionneraient les techniques de commercialisation à la fois pour les clients et les industriels.

Les défilés et catalogues virtuels offriraient une amélioration conséquente pour le client

de la représentation du produit, ce qui constituerait sûrement un moteur supplémentaire pour la vente en ligne qui a pris son envol ces dernières années. Grâce à ces applications, il serait également envisageable de proposer aux clients une confection plus personnalisée de modèles aux mesures standard pour lesquels ils pourraient choisir couleurs et matières.

La fabrication sur mesure automatisée donnerait accès à un niveau encore plus personnalisé de fabrication, puisqu'elle permettrait à chacun de concevoir le modèle désiré aux mesures exactement adaptées. Cette production automatisée transformerait alors fondamentalement le processus d'achat rendant alors obsolète la fabrication préalable des vêtements et ainsi supprimerait les problèmes d'inventus et de gestion des stocks.

1.2 Enjeux de la thèse

Mon objectif était de trouver une méthode permettant de générer des modèles 3D réalistes correspondant à des étoffes tricotées utilisant un nombre de liages aussi conséquent que possible. Une fois familiarisée avec les techniques industrielles de tricot, je me suis aperçue que si les types de liages sont nombreux, ils correspondent à un jeu réduit d'opérations réalisées sur les métiers : combinaisons de mailles, charges, fils de trame, Notre intention était en fait de générer ces modèles d'après la description technique normalisée de l'étoffe, c'est à dire dans le langage habituel de description des professionnels : le langage vermicelle.

Dès nos premiers résultats, une perspective nouvelle et imprévue a émergé aux yeux de nos partenaires de l'IFTH : la création d'un outil interactif de formation aux techniques de bonneterie. En effet, jusqu'alors la formation théorique avait lieu sur « papier » à l'aide de manuels et d'échantillons de tricot et était complétée par un passage sur métier afin de bien appréhender la structure effective d'un liage donné. Cette étape permettait par ailleurs de mettre en évidence les incohérences de certains liages envisagés par les stagiaires suivant cette formation. Notre modélisation topologique permettant d'engendrer la topologie d'un tricot à partir de sa définition en langage vermicelle constitue donc un outil de formation immédiatement utilisable car il élimine la nécessité des tests sur métiers et permet aux stagiaires de tester la validité de leurs liages et d'observer la topologie

générée. L'IFTH souhaiterait à terme pouvoir également utiliser ce moteur au sein d'une méthode d'apprentissage en ligne type « e-learning » et ainsi offrir un outil de formation à distance.

L'objectif principal de la thèse restait tout de même le prototypage virtuel. Pour cela, notre démarche est de fournir, pour tout liage représentable en vermicelle, une modélisation topologique exacte correspondant à l'état « étiré » du tricot tel qu'il est sous tension sur le métier en cours de tricotage. L'étape suivante sera de calculer l'état relâché du tricot par relaxation afin d'obtenir une étoffe topologiquement et géométriquement exacte que nous pourrons ensuite animer. Il est primordial que la topologie fournie au moteur d'animation soit précise et exacte pour assurer la cohérence des résultats lors du calcul de la relaxation du tricot. Dans le cadre d'un prototypage virtuel de tricots à usage technique, la fidélité du comportement mécanique et physique de l'étoffe numérique revêt un caractère essentiel supplémentaire par rapport aux tricots destinés à l'habillement.

1.3 Présentation du logiciel

L'objectif de notre moteur topologique étant de fournir la topologie d'un tricot réalisé à partir d'un motif dessiné par l'utilisateur, deux solutions s'offrent à nous : soit une méthode statique recourant à l'utilisation d'une bibliothèque exhaustive de motifs, soit une méthode dynamique analysant et modélisant automatiquement le motif dessiné. En admettant que l'on puisse obtenir une liste exhaustive des motifs existants, ce qui paraît difficilement réalisable étant donné le grand nombre de combinaisons de liages possibles, cette méthode serait lourde à mettre en place et rigide à utiliser car il serait effectivement impossible de tester des motifs absents de la bibliothèque.

Par ailleurs, l'importante combinatoire des assemblages de liages possibles au sein d'un même tricot provoque des déformations de mailles qui doivent être générées spécifiquement, du fait, ici encore, de l'impossibilité de prévoir à l'avance l'ensemble des combinaisons. Désireux d'utiliser des données libres et universelles pour générer notre simulation et après consultation de nos partenaires de l'I.F.T.H, nous avons choisi le langage vermicelle déjà introduit dans les chapitres précédents.

Les deux chapitres à venir présenteront, dans un premier temps le moteur permettant de générer la géométrie traduisant la topologie 3D d'un tricot à partir de données métiers. Puis dans un deuxième temps le logiciel développé vous sera décrit.

Chapitre 2

Le cœur : Modélisation topologique et géométrique à partir de données métier

Sommaire

2.1	Géométrie de la maille	63
2.1.1	Choix d'une modélisation basée fil	63
2.1.2	L'élément de base de notre modélisation : les BPs	63
2.2	Analyse du motif	66
2.2.1	Les règles de traitement du motif	66
2.2.2	Mise en place	75
2.3	Genèse de la topologie à partir des BPs	79
2.3.1	Modélisation d'un fil	79
2.3.2	Trajectoire des fils au sein du tricot	80
2.4	Les métacylindres	81
2.4.1	Interpénétration de fils	81
2.4.2	Création des métacylindres	83

2.1 Géométrie de la maille

2.1.1 Choix d'une modélisation basée fil

Comme nous l'avons évoqué auparavant, les propriétés d'un tricot dépendent principalement des fils qui le composent et de leurs trajectoires au sein de celui-ci. Partant de cette constatation, nous avons, comme Jean-Michel Nourrit avant nous, choisi la trajectoire du fil comme élément central de notre modèle. Choisir cette échelle et ainsi privilégier un modèle local réaliste en modélisant la trajectoire des fils et leurs interactions au sein de l'étoffe tricotée peut sembler ambitieux. En effet, modéliser un vêtement complet composé de plusieurs milliers de mailles peut se révéler très coûteux en capacité de stockage ainsi qu'en temps de calculs. Cependant la volonté affichée d'axer la recherche sur la simulation de motifs locaux de tricots, réduit la taille des étoffes à tester mais accentue la nécessité de réalisme du comportement mécanique et physique de l'étoffe à petite échelle.

Par ailleurs, si ce travail de thèse n'a pas permis de mettre en place l'étape de relaxation afin de simuler l'état relâché du tricot, nous avons cependant toujours orienté nos choix de développement afin de pouvoir intégrer à moindre coût notre modèle topologique dans le moteur d'animation dynamique développé au laboratoire. Ce moteur, disposant d'un modèle de splines matérielles dynamiques, il paraissait évident d'utiliser des courbes splines pour définir la trajectoire des fils dans notre moteur topologique.

2.1.2 L'élément de base de notre modélisation : les BPs

Notre modèle géométrique de maille repose sur des courbes splines tridimensionnelles de Catmull-Rom ([CR74]), courbes interpolantes et facilement manipulables permettant de représenter la trajectoire du fil au sein du tricot. La position spatiale des points de contrôle de ces courbes est définie principalement par le type du liage (mode de tricotage, comme par exemple le jersey, les côtes, les charges...) et par les caractéristiques géométriques et mécaniques des fils utilisés.

Comme nous l'avons vu auparavant, les mailles d'un tricot sont constituées de boucles de fil entrelacées. Selon le liage considéré, ces boucles peuvent subir des déformations plus

ou moins prononcées. Une fois le motif dessiné et analysé, il faut générer la topologie du tricot.

Pour cela, la première étape est de définir le type de géométrie de la maille. Le choix de cette dernière est stratégique tant sur le plan du volume des données que l'on aura à traiter, que sur l'utilisation directe que l'on pourra en faire pour générer la topologie du tricot.

D'après le cycle de formation d'une maille présenté dans la première partie de ce document, une maille tient la maille du dessous tricotée antérieurement sur la même aiguille et elle est tenue par la maille du dessus qui sera tricotée lors du prochain passage du chariot. Une maille est donc en contact avec ses voisines dans la même colonne de mailles en quatre points. Pour nous, géométriquement, une maille est donc définie par ces quatre points de contact : deux points au niveau des pieds de la maille et deux au niveau de la tête de la maille (figure 2.1). Les points sont espacés horizontalement de la valeur de

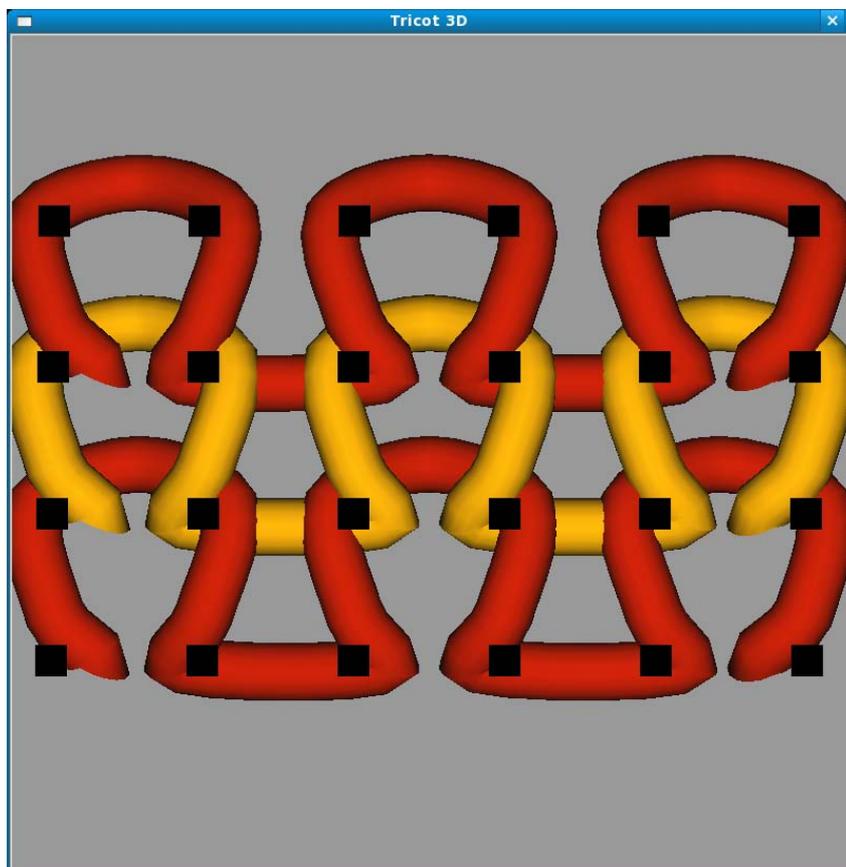


FIG. II.2.1 – Points de contact

la jauge, et verticalement de la valeur choisie par l'utilisateur comme étant la hauteur de maille ; grâce à ces deux valeurs il sera possible de retrouver la longueur de fil absorbée par une maille.

Ces quatre points définissent les points de contact de la maille avec ses voisines du dessus et du dessous (ses voisines latérales étant dans le prolongement du fil). Sur ce point, nous rejoignons la démarche de Meißner et Eberhardt [ME98] qui ont défini 4 points de contact (Bonding Point ou BP) pour une maille.

Un point de contact peut être partagé par plusieurs mailles : il peut se situer au niveau de la tête de la maille inférieure et au niveau des pieds de la maille supérieure par exemple. Il faudra donc stocker dans un point de contact bien plus que sa position spatiale, mais également la liste des mailles dont il fait partie et surtout la position du point au sein de chacune d'entre elles.

Par contre, pour définir la topologie complète d'un tricot issu de n'importe quel liage, il a fallu prévoir la création de ces points de contact quelle que soit l'opération réalisée sur l'aiguille (figure 2.2). C'est pourquoi, on ne définira pour une charge que deux points de contact au niveau de la tête de la maille car c'est à ce niveau que le fil de charge est en contact avec la maille qu'il vient doubler. Pour un flotté, aucune maille n'étant générée, nous ajoutons également deux points de contact au niveau des pieds de la maille, c'est à ce niveau que le fil peut rencontrer celui de la maille du dessous.

Nous souhaitons qu'à partir de cette définition d'une maille nous puissions retrouver la topologie *in extenso* du tricot. Pour cela, un point de contact (figure 2.2), quand il est généré reçoit comme information sa position spatiale tridimensionnelle, sa situation dans la maille (en bas à gauche, en haut à gauche, en bas à droite ou en haut à droite), le « type » d'opération qui a été réalisé et dont il fait partie (maille, charge, flotté), la fonture sur laquelle il a été créé (fonture avant ou arrière), la liste des fils qui passent par ce point ainsi que le point qui le précède. Les points de contact ainsi définis permettent donc non seulement de définir la géométrie des mailles mais également de déterminer la topologie du tricot.

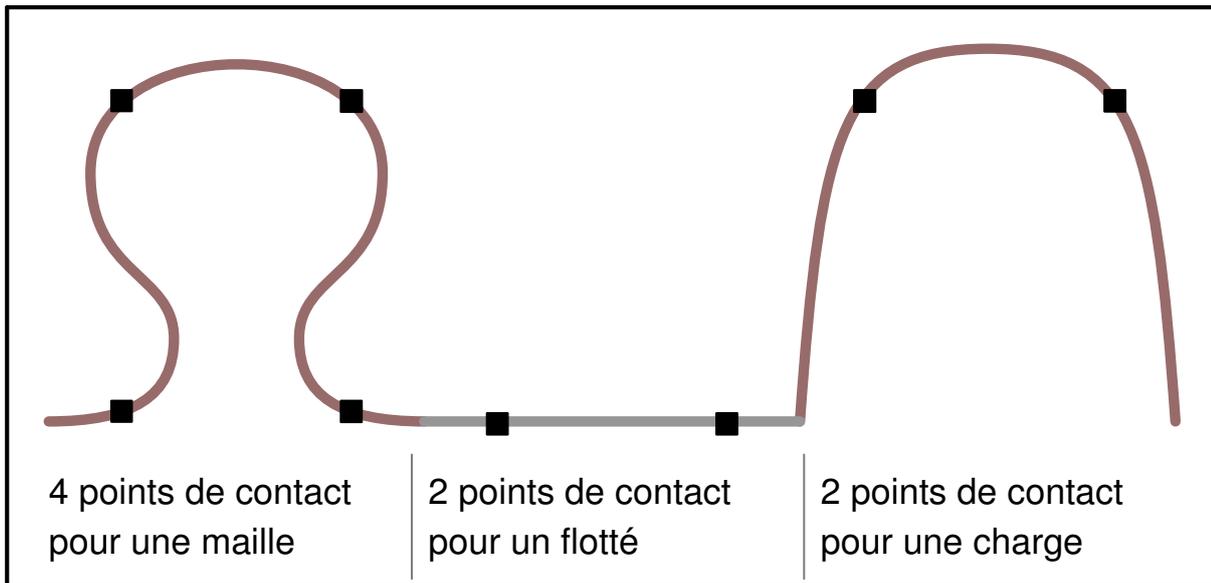


FIG. II.2.2 – Définition des points de contact en fonction de l'opération réalisée

2.2 Analyse du motif

2.2.1 Les règles de traitement du motif

Utiliser le langage « vermicelle » en entrée de notre outil de modélisation présente un avantage supplémentaire : tout motif a une représentation, ce qui permet d'expliquer simplement les liages les plus complexes. Une fois dessiné, le motif est analysé pour déterminer si certaines mailles vont subir des déformations et notamment des allongements. C'est précisément cette étape qui a demandé une phase conséquente d'extraction de connaissances auprès de nos experts. Il n'existait pas de règle établie permettant de déterminer si la réalisation d'un motif allait engendrer des allongements de mailles. Si élevé que soit le degré d'expertise des professionnels de la maille, il n'en demeure pas moins qu'ils déterminent la présence d'allongement de mailles dans un tricot à partir de son liage uniquement de manière empirique. Il y a donc eu un travail important de formalisation du savoir-faire de nos partenaires, afin de déterminer des règles de traitement du motif permettant de prévoir la présence (ou l'absence) d'allongements de mailles.

La principale de ces règles établit qu'il y a allongement s'il y a déséquilibre quant au nombre de mailles réalisées sur les différentes colonnes de mailles du motif (figure 2.3 et

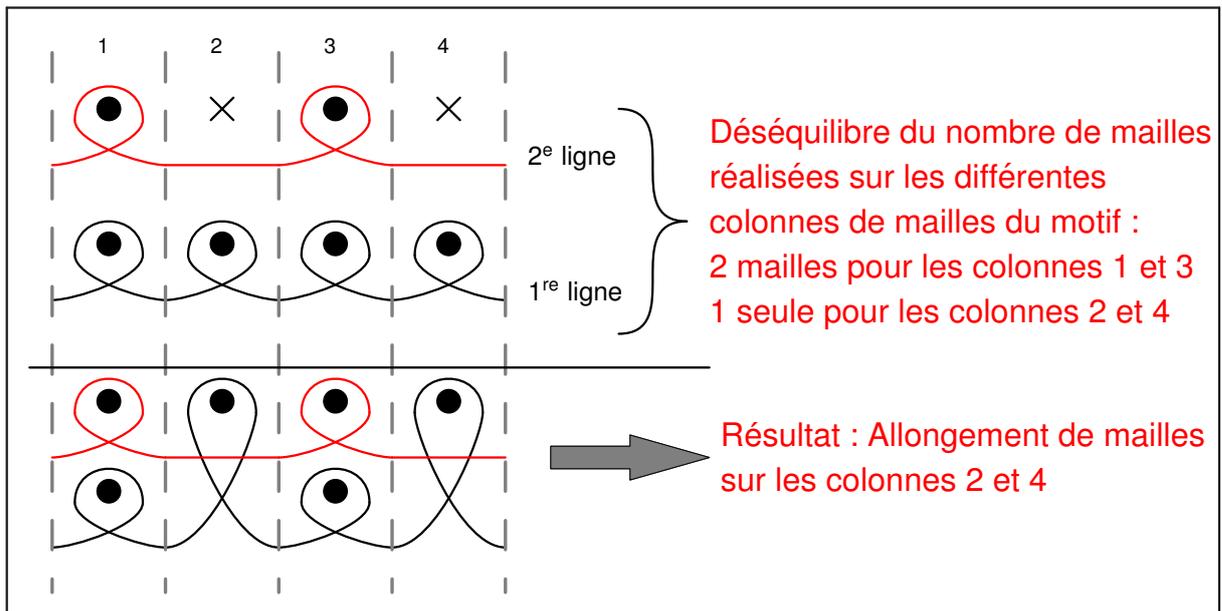


FIG. II.2.3 – Illustration de la règle du « déséquilibre »

figure 2.4). Cette règle est très intuitive si on se rapporte au fonctionnement des métiers à tricoter.

Nous avons vu précédemment qu'à chaque fois qu'une maille est réalisée sur une aiguille celle-ci vient s'entrelacer avec la dernière maille tricotée auparavant et conservée dans le bec de l'aiguille. Les mailles s'empilent ainsi en colonne de mailles, la dernière maille réalisée sur chaque aiguille attendant que la prochaine vienne la cueillir. Chaque maille d'une rangée de mailles vient donc s'ajouter à la colonne de mailles correspondant à l'aiguille sur laquelle elle a été produite.

Or, si toutes les colonnes contiennent le même nombre de mailles, ces dernières seront toutes de la même hauteur alors que si certaines colonnes sont composées de moins de mailles, ces dernières devront s'allonger pour compenser les absences de maille sur la ou les rangées concernées et permettre à la prochaine maille de s'accrocher (figure 2.4).

On ne tiendra compte des déséquilibres quant au nombre de mailles réalisées dans le traitement du motif que pour les colonnes de mailles où au moins une maille est réalisée. Nous venons de voir qu'un allongement de maille sert à compenser l'absence de maille sur une rangée de mailles pour une colonne donnée par rapport aux autres colonnes du motif. C'est donc bien une maille existante, déjà tricotée et retenue dans le bec de l'aiguille

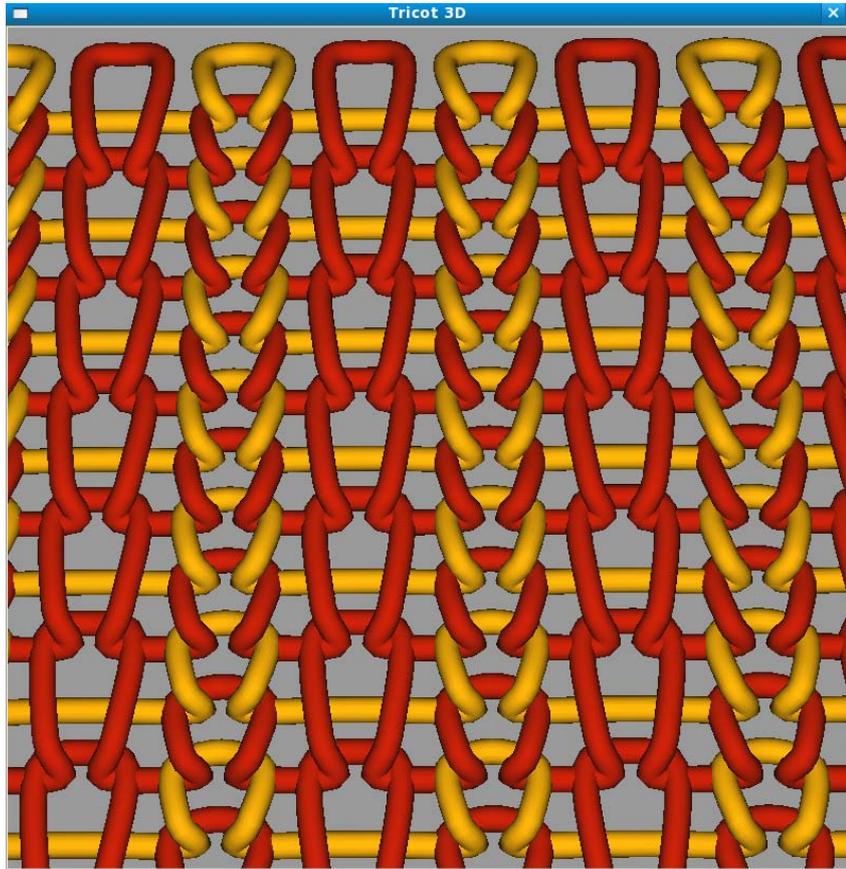


FIG. II.2.4 – Illustration de la règle du « déséquilibre » : géométrie générée

qui va s’allonger et ainsi permettre aux mailles réalisées ultérieurement sur cette colonne de mailles de s’accrocher. Or, dans la mesure où aucune maille n’est réalisée sur une aiguille, aucune maille ne se trouve dans son bec, et donc aucune maille n’est susceptible de s’allonger.

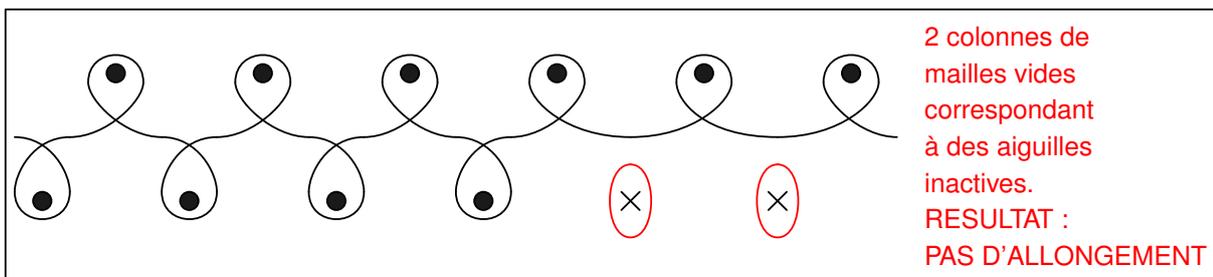


FIG. II.2.5 – Influence de colonnes de mailles vides dans l’analyse du motif sur le liage d’une côte Richelieu 4/6

Lorsque nous détectons une colonne de mailles totalement vide sur le motif, on traite le motif en omettant de traiter cette colonne de mailles (figure 2.5), c'est-à-dire qu'on ne considère pas les déséquilibres de nombres de mailles réalisés relevés par rapport aux autres colonnes.

Dès nos premières ébauches logicielles, l'analyse de la structure tricotée des liages et l'expérience des tricoteurs nous ont conduit à un autre constat. Il apparaît que nous ne formons pas nécessairement le même nombre de rangées de mailles qu'il y a de lignes sur le motif. On peut en effet observer que plusieurs lignes d'un motif, si elles sont « imbriquables », n'engendrent qu'une seule rangée de mailles (figures 2.6 et 2.7), puisque localement toutes les colonnes ont le même nombre de mailles.

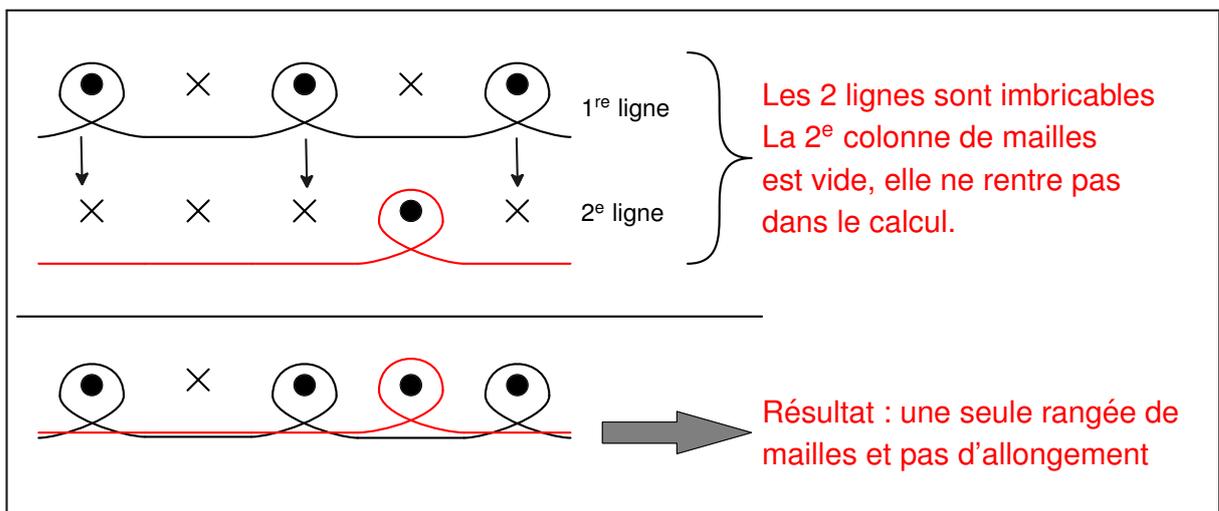


FIG. II.2.6 – « Imbrication » de plusieurs lignes d'un motif

Pour parvenir à ce résultat, nous avons établi, avec nos partenaires, une règle supplémentaire à utiliser lorsque nous analysons notre motif. Cette marche à suivre consiste à tester si les évolutions successives sont imbriquables ; tant qu'elles le sont, il n'y a qu'une seule rangée de mailles à générer. On considère, en fait, qu'on empile les évolutions successives du motif tant qu'elles sont imbriquables pour former une seule rangée de mailles.

L'exemple précédent illustre notre raisonnement pour des structures à une seule fonture, ce dernier reste valable pour des structures à deux fontures quelque soit le calage des aiguilles (côte ou interlock). La figure 2.8 illustre le traitement d'un liage que nous

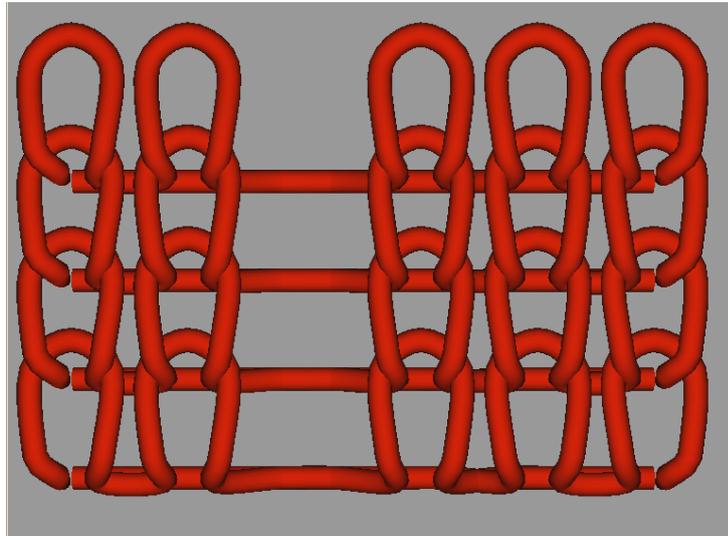


FIG. II.2.7 – « Imbrication » de plusieurs lignes d'un motif : topologie générée

avons déjà évoqué : l'**Interlock 1 et 1**. C'est lors de l'étude de ce liage qu'a germé cette règle dans notre esprit.

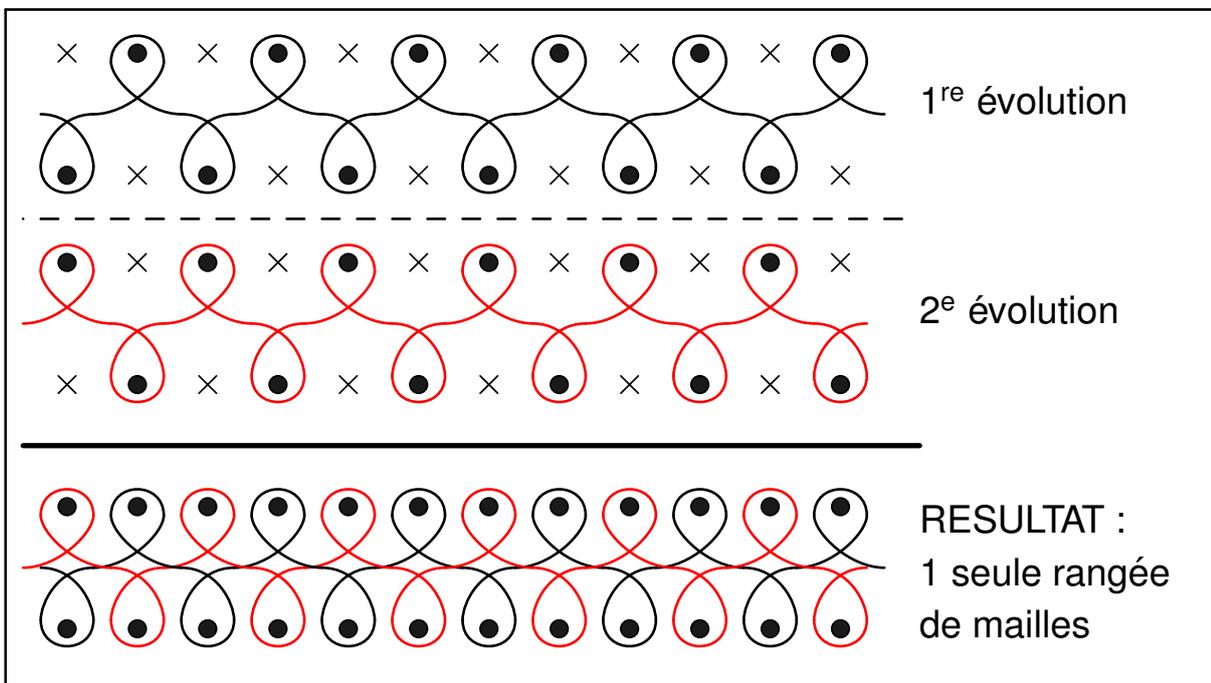


FIG. II.2.8 – Imbrication des rangées de mailles dans un tricot interlock 1 et 1

La figure 2.9 donne la topologie générée correspondant au liage du tricot **Interlock 1 et 1**.



FIG. II.2.9 – Topologie générée par le liage correspondant à l'interlock 1 et 1

Il est à noter que le schéma de liage d'un tricot issu du **spacer 3D** comporte trois évolutions imbricables ; ainsi ce motif correspond à une seule rangée de mailles tricotées (figure 2.10).

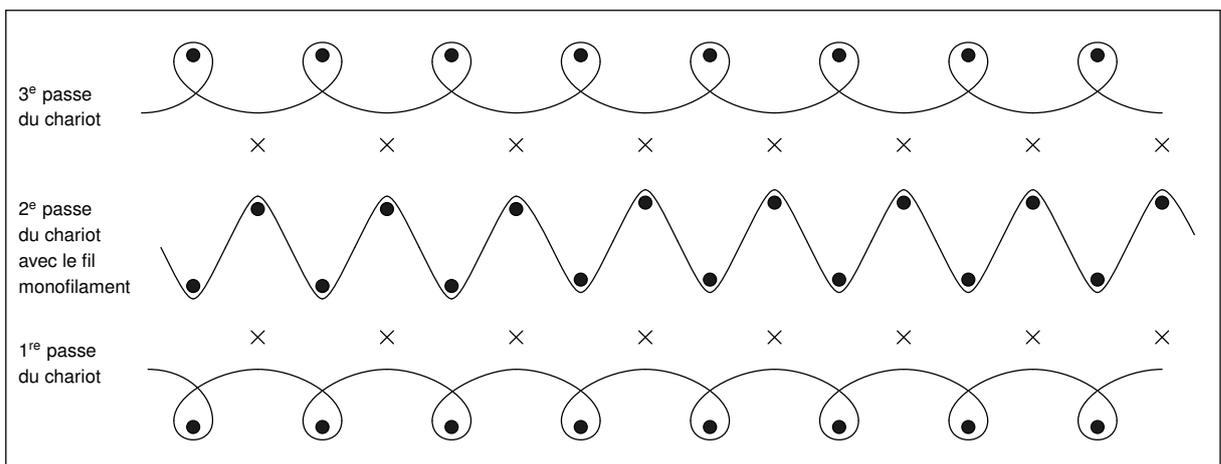


FIG. II.2.10 – Graphe de liage d'un tricot issu du spacer 3D

Sur la topologie générée de la figure 2.11, on observe bien que les deux rangées de **jersey** constitueront les deux faces de notre étoffe ; le fil formant alternativement les charges sur chaque fonture (entretoise) confère le relief au tricot. Les principaux facteurs

influent sur la géométrie de ces liages sont la distance entre fontures et les caractéristiques des entretoises telles que le diamètre du fil ou la densité des entretoises (définie par la jauge du métier).

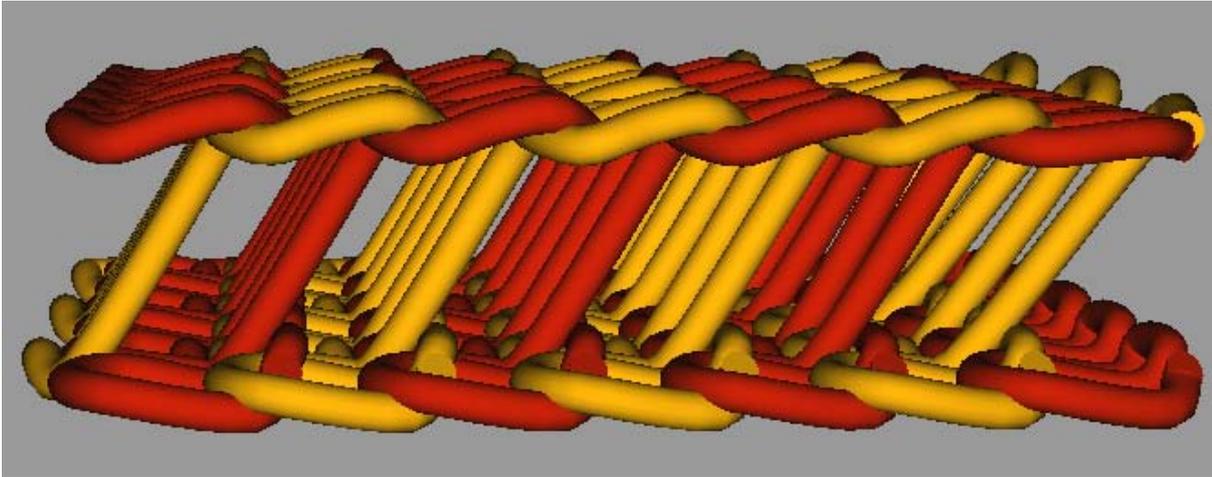


FIG. II.2.11 – Topologie générée pour un liage de tricot « type » spacer 3D

Examinons maintenant un liage dont les évolutions ne s'imbriquent pas tel que le tricot **maille plate** représenté sur la figure 2.12. Les évolutions successives ne s'imbriquent pas et il y a déséquilibre quant au nombre de mailles tricotées par colonne de mailles. D'après les deux règles que nous avons énoncées, il y aura allongement de mailles. En réalité sur cet exemple, deux mailles seront tricotées sur la fonture arrière pendant qu'une seule sera sur la fonture avant, c'est pourquoi les mailles fabriquées sur l'avant seront deux fois plus hautes que les mailles arrières.

Cependant, ces règles ne sont pas suffisantes car il existe des motifs dont le nombre de mailles réalisées par colonne de mailles est identique mais pour lesquels il y a allongement. C'est le cas, par exemple, pour le motif de la figure 2.13. Il faut donc affiner la règle du « déséquilibre ». Le bilan réalisé sur le nombre de mailles effectuées par colonnes de mailles ne doit pas être réalisé à l'échelle du liage complet, mais au niveau local de chaque rangée de mailles avec sa(ses) précédente(s). En effet, si deux évolutions successives du motif ne sont pas imbricables, il faut tester la présence d'un déséquilibre « local » en comptant le nombre de mailles par colonne pour chaque évolution. En cas de déséquilibre, il y aura allongement.

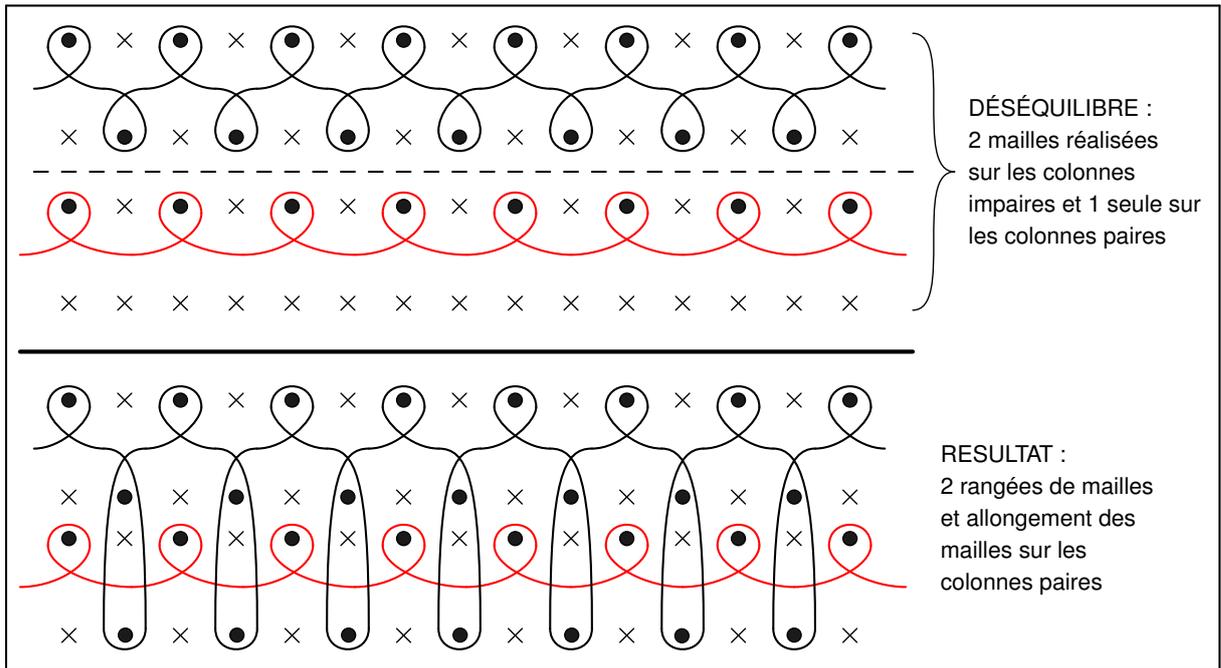


FIG. II.2.12 – Illustration de la règle du « déséquilibre » d'un motif à deux fontures

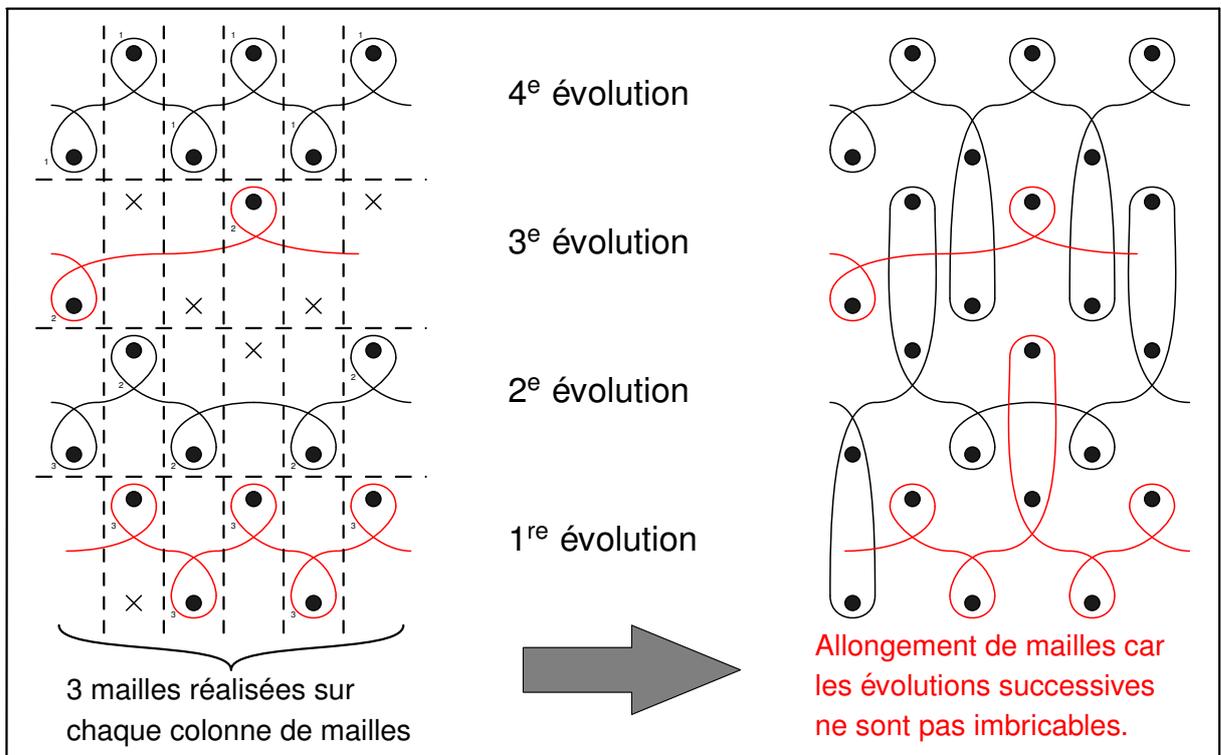


FIG. II.2.13 – Allongement de maille malgré l'égalité du nombre de mailles par colonne

Comparer localement les déséquilibres comporte toutefois une faille : si deux rangées successives non imbricables sont équivalentes en terme de nombre de mailles réalisées par aiguille, aucun allongement ne sera décelé sur la dernière évolution d'après les règles établies jusqu'à présent. Or si un allongement avait été décelé sur l'avant-dernière rangée au niveau d'une aiguille, cela signifie qu'une maille est encore prise dans le bec de celle-ci et attend qu'une nouvelle maille vienne la cueillir. Si aucune maille n'est réalisée sur cette aiguille au cours de la prochaine rangée de mailles, la nécessité d'allongement doit donc être propagée sur cette dernière rangée pour compenser cette nouvelle absence de maille (figure 2.14).

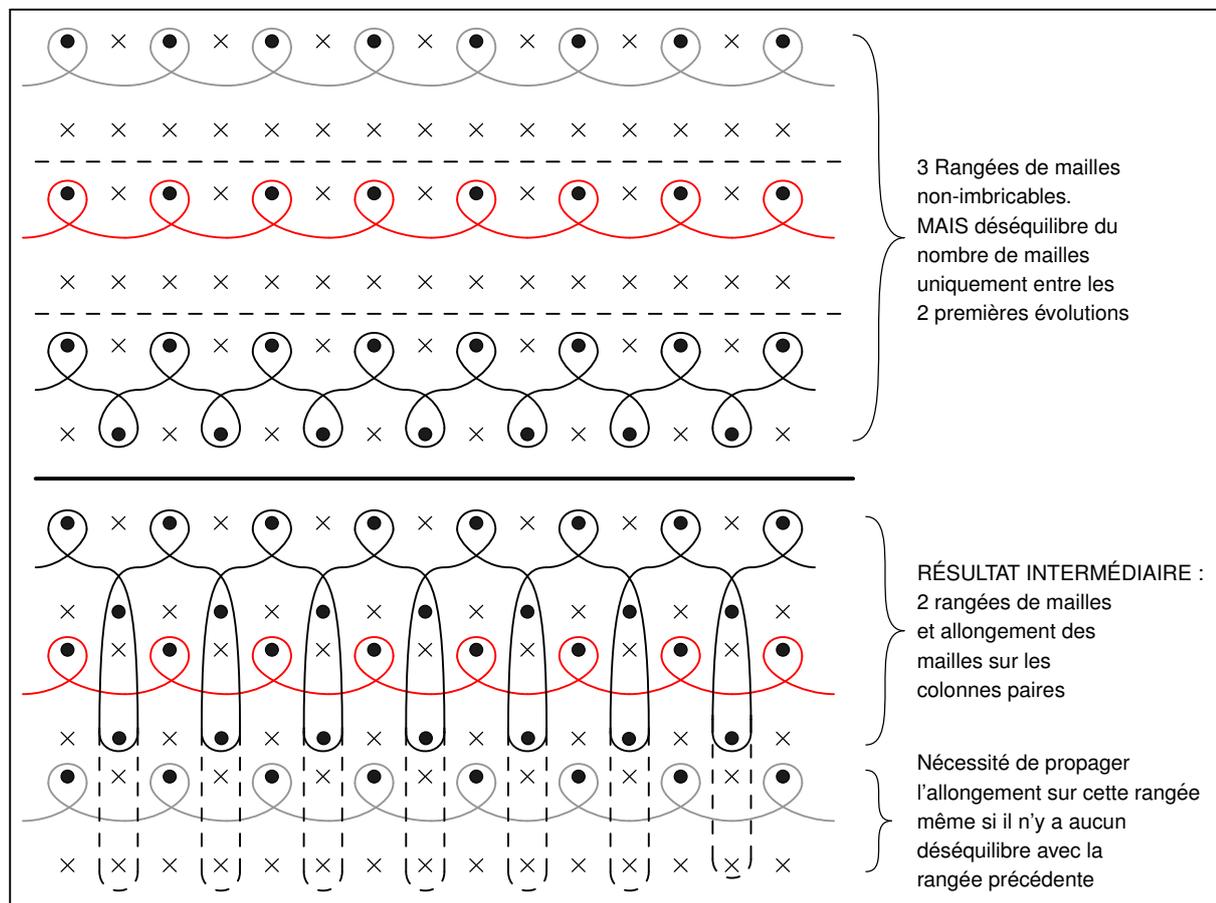


FIG. II.2.14 – Propagation de l'allongement dans un motif en cas d'inactivité temporaire d'une aiguille

Une fois ces premières règles définies, les résultats obtenus étaient très encourageants ; cependant l'ajout de nouveaux liages réussissait encore à mettre en défaut notre modèle.

Après concertation avec nos experts, nous comprenons qu'il manquait encore une notion primordiale à notre modèle : la périodicité. En effet, la périodicité du motif amène à considérer les lignes du motif comme étant sur un « anneau », c'est-à-dire que la dernière ligne du motif est directement suivie de la première. Un motif à trois lignes a donc trois représentations possibles et équivalentes comme par exemple sur la figure 2.15. Les diffé-

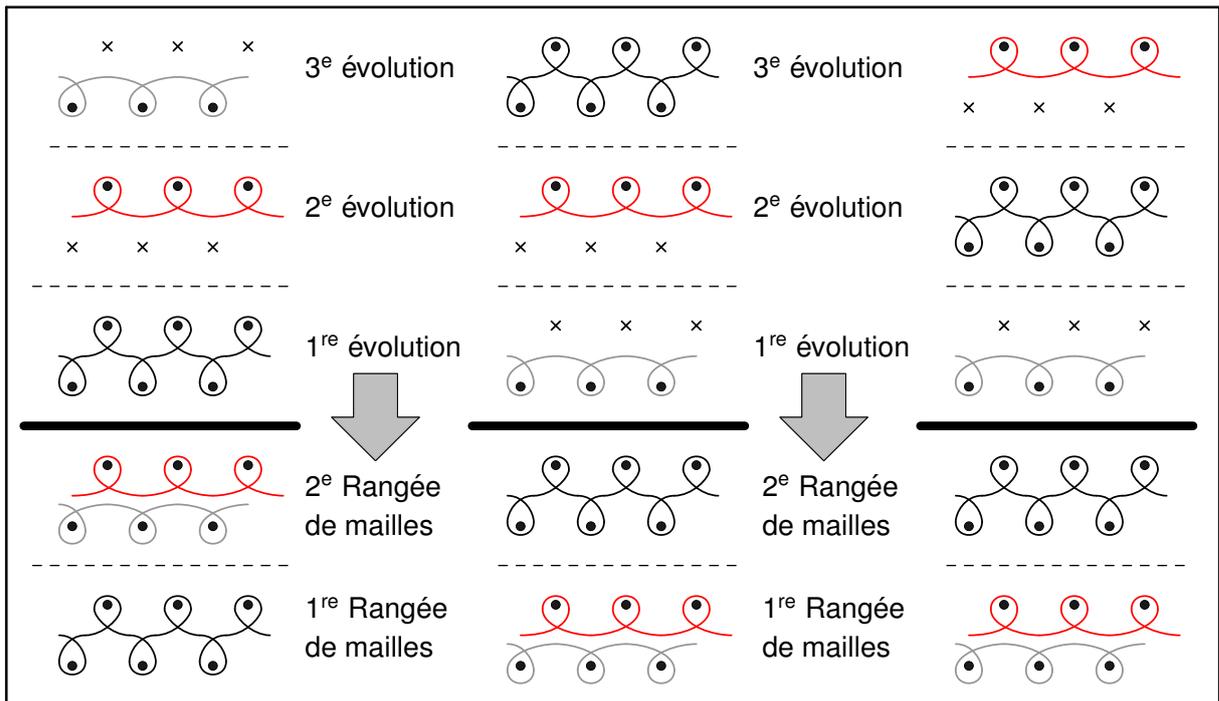


FIG. II.2.15 – Analyse du motif des trois représentations équivalentes du point de Rome

rentes représentations étant équivalentes, leur analyse doit conduire au même résultat en terme de présence ou d'absence d'allongement de mailles. Or, si pour les deux premiers modèles de la figure 2.15, il apparaît intuitivement qu'il n'y aura pas d'allongement et que le modèle générera deux rangées de tricot, cela est nettement moins évident sur la dernière représentation du motif. Pour obtenir ce dernier résultat, la première et la dernière ligne du motif doivent être considérées comme voisines et donc potentiellement imbricables.

2.2.2 Mise en place

Pour déterminer à partir du motif dessiné sur l'interface, les rangées de mailles qui seront effectivement générées ainsi que la présence éventuelle d'allongements, il faut en

premier lieu « traduire » le schéma vermicelle du motif dans un type de données que nous pourrions facilement utiliser. Nous avons choisi un alphabet simple (Table 2.1) qui permet une traduction aussi aisée qu'économique puisque nous stockons notre motif dans un tableau de caractères dont la taille est le produit du nombre d'aiguilles composant le motif par le nombre d'évolutions nécessaires à sa conception. Une fois le tableau de caractères correspondant au motif initialisé nous pouvons déterminer les actions réalisées sur chaque aiguille et pour chacune des évolutions du motif.

	Symbole « vermicelle »	Lettre associée
Maille Endroit		g
Maille Envers		e
Charge Endroit		v
Charge Envers		n
Flotté sur l'endroit		-
Flotté sur l'envers		+

TAB. 2.1 – L'alphabet choisi pour traduire le « vermicelle »

Nous avons ensuite implémenté la classe **Rangée** qui contient notamment un tableau

d'entiers composé d'autant de cases que d'aiguilles composant le motif. Les valeurs de toutes les cases du tableau sont initialisées à zéro car il s'agit en fait du nombre de mailles retenues dans le bec de chaque aiguille pour une rangée donnée. Les valeurs acceptables sont donc zéro ou un ; le bec d'une aiguille ne pouvant pas contenir plus d'une maille à la fois, car comme nous l'avons vu précédemment, la formation d'une nouvelle maille vide le bec de l'aiguille de son contenu préalable grâce à une ascension complète de l'aiguille. En conséquence, la charge n'est pas considérée comme une maille puisqu'elle ne vide pas le bec de l'aiguille.

La classe **Rangée** est dotée d'une méthode qui teste l'imbrication de deux rangées en s'assurant que si on cumule les opérations effectuées sur chaque aiguille, en ajoutant case à case les valeurs de leur tableau respectif, aucun résultat n'est supérieur ou égal à deux. Si deux **Rangées** sont imbricables, on peut alors les **additionner** en faisant la somme case à case des valeurs contenues dans leur tableau.

Nous avons implémenté l'algorithme 1, selon lequel nous traitons les différentes évolutions du motif et grâce auquel nous générons la liste de **Rangées** qui seront effectivement tricotées. Il nous permet de déterminer les rangées de mailles réellement générées par un motif donné. Chaque évolution est considérée comme une **Rangée**.

Lors du parcours du motif (qu'on évalue ligne par ligne), on initialise chaque **Évolution** à partir de la définition « alphabétique » des lignes de notre motif : si une maille est réalisée (c'est-à-dire lorsqu'on croise les lettres « g » ou « e » dans le tableau de caractères définissant notre motif), on attribue la valeur un à la case correspondant à l'aiguille sur laquelle la maille a été effectuée dans l'**Évolution**, les autres cases sont initialisées à zéro. On teste ensuite si l'**Évolution** et la **Rangée en cours** sont imbricables, si elles le sont, on ajoute l'**Évolution** à notre **Rangée en cours**. Dès qu'une nouvelle **Évolution** n'est plus imbricable avec la **Rangée en cours**, on insère cette dernière dans la liste des **Rangées** qui vont constituer le motif et on crée une nouvelle **Rangée en cours** initialisée avec l'**Évolution**.

Lorsqu'on a évalué toutes les lignes du motif et fabriqué la liste des **Rangées** engendrées par celui-ci, on teste si la première et la dernière **Rangée** sont imbricables ; si elles le sont, on ajoute la dernière **Rangée** à la première et on supprime la dernière **Rangée**

Algorithme 1 : Calcul des rangées de mailles générées par un motif

```
1 Liste < Rangée > Motif = Liste vide ;
2 Rangée RangéeEnCours = Rangée vide ;
3 pour chaque Ligne du motif faire
4   Rangée Évolution = Ligne du motif ;
5   si Évolution et RangéeEnCours imbricables alors
6     RangéeEnCours += Évolution ;
7   sinon
8     Ajouter RangéeEnCours au Motif ;
9     RangéeEnCours=Évolution ;
10 si Première et Dernière Rangée du Motif imbricables alors
11   PremièreRangée += DernièreRangée ;
12   Supprimer la Dernière Rangée du Motif ;
```

de la liste. Cette condition ne peut être rencontrée qu'une fois au plus par motif puisque les imbrications des premières ou des dernières lignes ont été traitées dans la boucle.

La classe **Rangée** contient une méthode **CalculerAllongement** qui permet de comparer deux **Rangées** : une rangée et sa précédente. Cette fonction parcourt alors les deux rangées et teste si il y a déséquilibre sur les colonnes de mailles, en comparant case à case les tableaux respectifs des deux rangées, en cas d'inégalité entre deux cases respectives, il y a donc allongement sur l'aiguille correspondante et sur la rangée où la maille est réalisée. Pour chaque case nulle de la rangée courante, on teste la présence d'un allongement à cet endroit sur la rangée précédente, le cas échéant on prolonge cet allongement à la rangée en cours.

Ensuite, il suffit alors de parcourir la liste de **Rangées** du motif et d'appeler **CalculerAllongement** pour chaque **Rangée** et sa suivante. Ainsi nous connaissons, s'il y en a, la présence et la localisation de chaque allongement.

2.3 Genèse de la topologie à partir des BPs

2.3.1 Modélisation d'un fil

Une fois le motif analysé, les points de contact de l'ensemble du tricot sont placés en tenant compte du type de la maille et de ses voisines (maille endroit ou envers, charge endroit ou envers), de l'opération réalisée (changement de fonture ou décalage d'une fonture) mais aussi de la jauge et de l'écartement des fontures.

La deuxième étape consiste à déterminer la trajectoire du fil au sein du tricot : cette opération fait principalement intervenir le type de liage (dans le cas d'une maille tricotée sur l'endroit, les jambes sont au dessus, alors que sur l'envers, ce sont la tête et les pieds qui sont visibles) constituant l'étoffe (le rayon du fil étant alors supposé constant). Toutes les informations nécessaires à la définition de cette topologie sont donc stockées dans nos points de contact.

Il existe de nombreuses courbes utilisées en C.A.O. et en synthèse d'images. Elles peuvent être classées en deux familles principales : les courbes « approximantes » (courbes de Bézier [Bez66][Bez77], B-splines [Rie73], β -splines [Bar81][BB83], NURBS [Pie91]) et les courbes « interpolantes » (splines Hermitiennes [BR74], splines TCB [KB84], splines de Catmull-Rom [CR74]). Les courbes approximantes ne passent pas par l'ensemble de leurs points de contrôle, par exemple dans le cas des courbes de Bézier cubiques, sur quatre points utilisés pour décrire la courbe, les deux points extrêmes sont définis et sur la courbe alors que les deux autres points servent à déterminer la forme de la courbe en définissant les tangentes aux extrémités. Par contre, les courbes interpolantes passent par l'ensemble de leurs points de contrôle.

Notre choix s'est porté sur cette dernière famille car nous souhaitons que la courbe passe par l'ensemble de ses points de contrôle qui sont en fait les points de contact définissant la géométrie de la maille. Choisir les courbes approximantes nous aurait obligés à ajouter des points de contrôle dont la position aurait été complexe à calculer pour garantir le passage de la courbe par nos quatre points de contact. Les splines de Catmull-Rom sont des courbes cubiques interpolantes, elles ont été développées pour modéliser des courbes et des surfaces complexes à partir de points de contrôle. Nous les avons choisies pour des

raisons de simplicité de manipulation lors de la modélisation des trajectoires.

2.3.2 Trajectoire des fils au sein du tricot

À ce stade de la modélisation, les points de contrôle des courbes sont les points de contact définis par l'étude du liage. Cependant, pour une maille ces points sont coplanaires et la trajectoire de la courbe interpolante passant par ces points ne permet pas d'entrelacement avec une autre boucle de fil. La maille ne peut pas être plane, elle a besoin de relief.

Pour parvenir à une topologie correcte, nous avons donc dû introduire de nouveaux points de contrôle dont la position est déterminée à partir de nos points de contact. En effet, tracer des splines de catmull-rom avec comme seuls points de contrôle nos points de contact aurait conduit à fabriquer des mailles « plates » (les points de contact d'une maille se situant tous dans le même plan) sans aucune possibilité d'entrelacement des fils.

Par exemple dans le cas d'un **jersey endroit** composé uniquement de mailles endroit [2.16](#), nous ajoutons deux points de contrôle au niveau des jambes de chaque maille afin de leur donner du relief et de permettre ainsi leur entrelacement avec les mailles voisines au sein de leur colonne de mailles.

Il s'agit donc de provoquer l'entrelacement des boucles de fil en avançant ou reculant les jambes des mailles suivant la fonture sur laquelle elles ont été tricotées. Pour une maille avant, par définition les jambes doivent être au premier plan, l'ajout des points de contrôle supplémentaires doit donc se faire dans le sens des z positifs. Inversement, dans le cas d'une maille tricotée sur la fonture arrière, on ajoutera les points de contrôle dans le sens des z négatifs pour « pousser » les jambes de la maille vers l'arrière plan et donc laisser la place au premier plan à la tête et aux pieds de la maille.

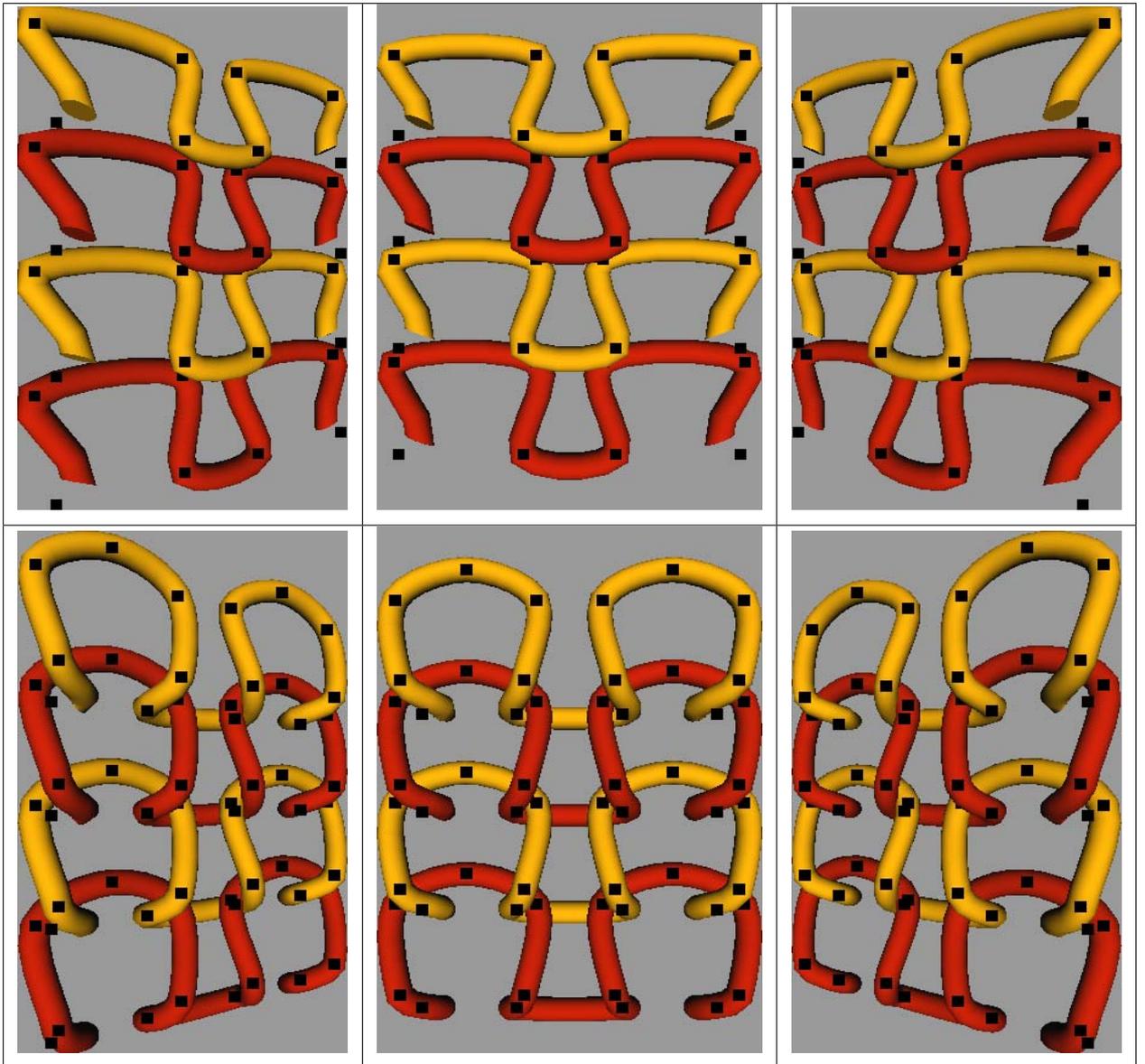


FIG. II.2.16 – Ajout de points de contrôle dans le cas d’une maille avant

2.4 Les métacylindres

2.4.1 Interpénétration de fils

Une fois les points de contact placés en utilisant les règles que nous avons déterminées et la topologie générée, il demeurerait un problème de fond : puisqu’il est possible que plusieurs fils se partagent un point de contact, il est également possible qu’ils partagent une même séquence de points. Dans ce cas, leurs trajectoires se confondent le temps de

cette séquence. La figure 2.17 illustre ce phénomène.

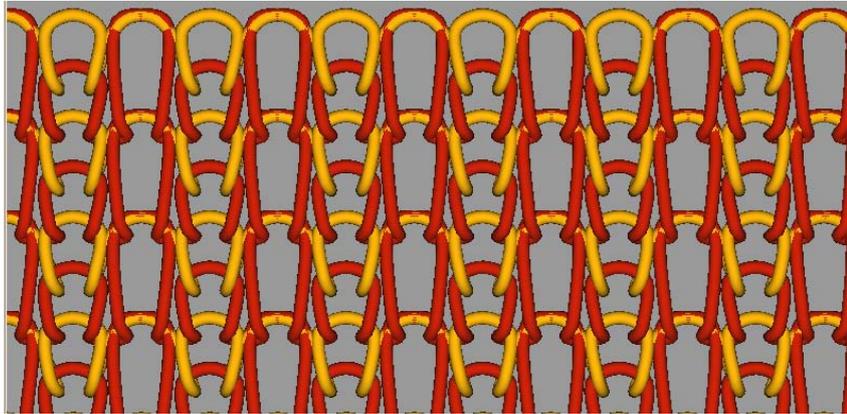


FIG. II.2.17 – Interpénétration des fils qui partagent la même trajectoire sur une portion de maille dans un tricot à mailles chargées

Cet état de la topologie n'est pas acceptable que l'on veuille l'utiliser en tant que résultat destiné à la formation ou en tant que trajectoires de fils à animer. Le moteur topologique utilisé comme outil pédagogique doit donner des images de tricot dont la topologie est précise et facile à interpréter. L'apprentissage sera en effet contrarié si la trajectoire des fils ne peut pas être clairement visualisée dès lors que deux fils sont censés passer au même endroit.

De même, lors de la phase de relaxation, si les courbes splines correspondant aux fils fournies au système mécanique s'interpénètrent dès l'état initial, les contraintes de contacts entre ces fils seront donc initialement violées, ce qui empêchera la convergence vers un état cohérent du système.

Ces partages de plusieurs points de contrôle consécutifs ont surtout lieu lorsqu'on effectue des charges ou des flottés. Une maille chargée comptera donc quatre points de contact, dont deux au niveau de la tête qu'elle partage avec la boucle de charge, venue doubler cette tête de maille (figure 2.18). Un flotté partagera ses points de contact avec les entremailles des mailles voisines dans sa rangée de mailles.

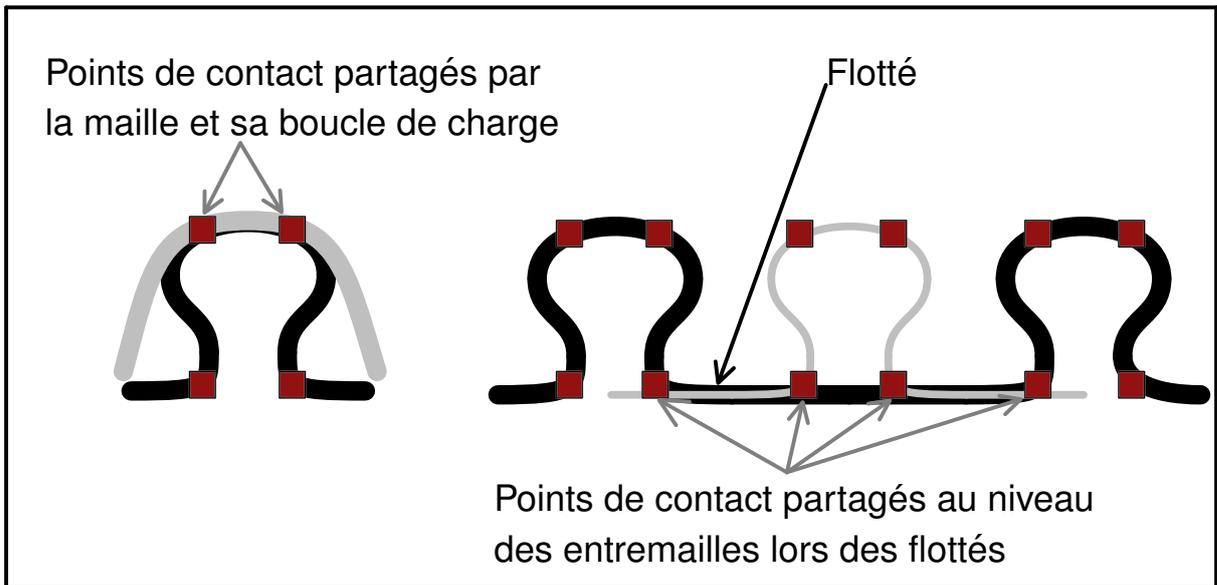


FIG. II.2.18 – Partage des point de contrôle

2.4.2 Création des métacylindres

Toujours dans la perspective de la phase de relaxation qui suivra ce travail sur la topologie, nous avons envisagé une solution originale pour la gestion de ces télescopes de fils. En effet, dans l'optique où, une fois corrigées, les trajectoires des fils impliqués dans les fusions resteront tangentes, la gestion des contacts entre ces fils alourdira considérablement la résolution du système mécanique. Dans ce contexte, il apparaît intéressant d'utiliser localement la réduction de paramétrage pour traiter cet agglomérat de fils comme un « métafil ou métacylindre » les englobant tous. Par conséquent, lors de la relaxation de notre tricot, nos métacylindres seront traités comme un seul fil de plus gros diamètre. La position relative des fils à l'intérieur de ceux-ci sera supposée constante, ce qui nous évitera de gérer les contacts entre les fils et réduira fortement le temps de calcul. La longueur des métacylindres que nous fabriquons est toujours équivalente à celle d'un fil reliant deux points de contact successifs.

D'après nos experts de l'IFTH, il n'y a pratiquement jamais plus de quatre fils qui partagent la même trajectoire. Néanmoins, dans un souci de généricité du modèle, nous avons choisi de considérer que ce nombre était illimité et cherché une méthode permettant

de placer n fils dans un métafil. Encore une fois, il n'existe aucune règle permettant d'anticiper comment se placeront les fils lorsqu'ils se chevauchent. Dans le cadre d'une charge, par exemple, il est impossible d'après les professionnels du tricot de savoir à l'avance si le fil de charge se superposera à la tête de la maille ou s'il se glissera derrière.

Par conséquent, nous avons établi un modèle permettant d'organiser ces fils en fonction de leur ordre chronologique d'arrivée ainsi que de la direction d'où ils viennent. Les fils composant le métacylindre sont repositionnés grâce à une translation. Nous translatons uniquement les deux points de contact situés aux extrémités du métafil. Nous calculons en réalité la translation à appliquer sur le premier point de contact et nous appliquons la même sur le deuxième.

Le premier fil arrivé occupe la position « normale », c'est-à-dire celle qu'il aurait occupée s'il était seul à suivre cette trajectoire. Arbitrairement et provisoirement, en attendant de mener des tests sur des liages réels, nous choisissons que le deuxième fil vient s'empiler sur le premier. Pour placer les suivants, on détermine et stocke les axes selon lesquels les fils à venir peuvent être positionnés. Pour identifier ces axes, on se place sur le disque correspondant à la section orthogonale du métacylindre. On maintient à jour la liste des médiatrices des segments reliant les centres des fils tangents. Plus exactement, seules les demi-droites dirigées vers l'extérieur de la section et non vers le centre sont stockées car, elles seules, représentent un axe de développement pour notre amas de fils (figure 2.19).

Pour choisir l'axe selon lequel nous allons ajouter le fil, connaissant la provenance de celui-ci, nous cherchons l'angle minimal formé par la provenance du fil et les différentes directions probables à notre disposition.

Une fois tous les fils placés, on les translate de manière à ce que l'isobarycentre de leurs centres respectifs corresponde au centre du métacylindre. Il ne reste plus qu'à déterminer le diamètre de ce métafil. Pour cela, pour chaque fil constituant le métacylindre, on calcule la distance entre le centre du métacylindre et le centre du fil à laquelle on ajoute la valeur du rayon de ce fil. Le diamètre du métacylindre sera ainsi la valeur maximale de cette somme. La figure 2.20 fournit la topologie du tricot à mailles chargées de la figure 2.17 corrigée grâce à l'ajout de métacylindre.

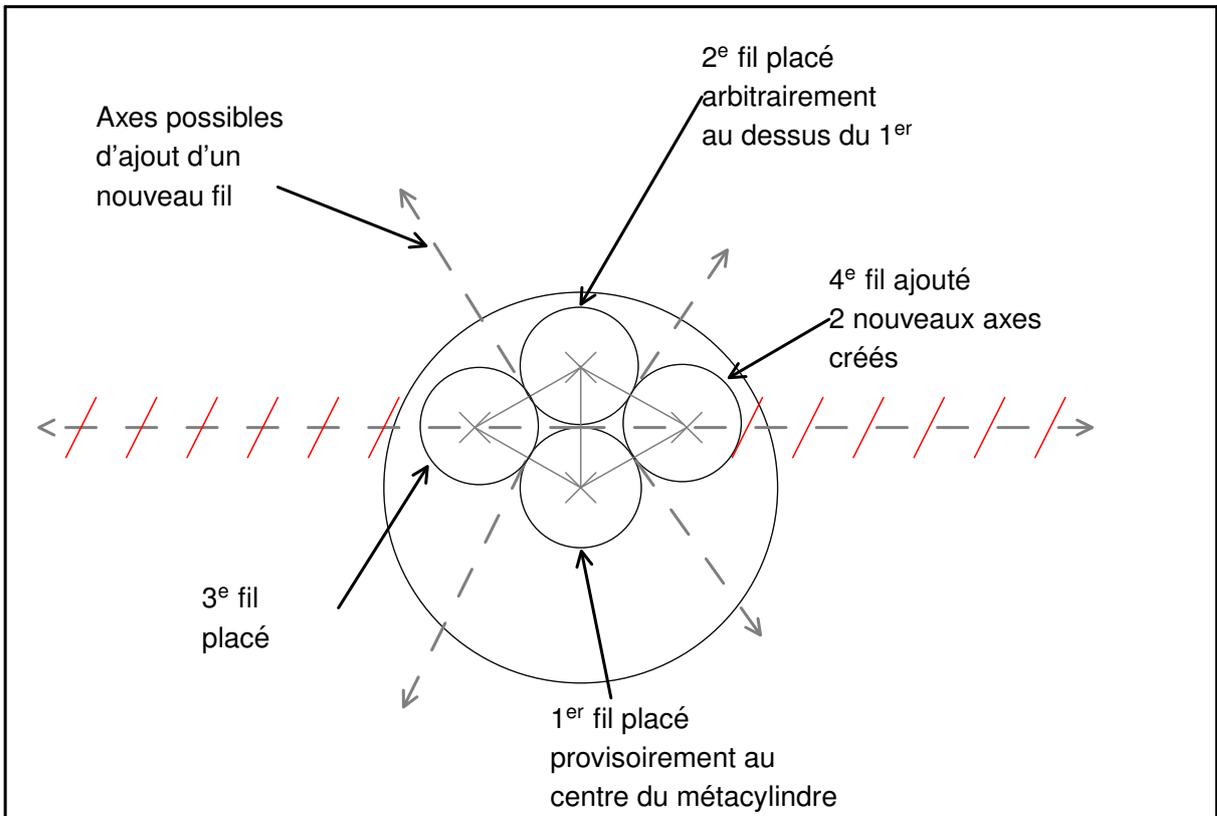


FIG. II.2.19 – Méthode d'organisation des fils pour former un métacylindre

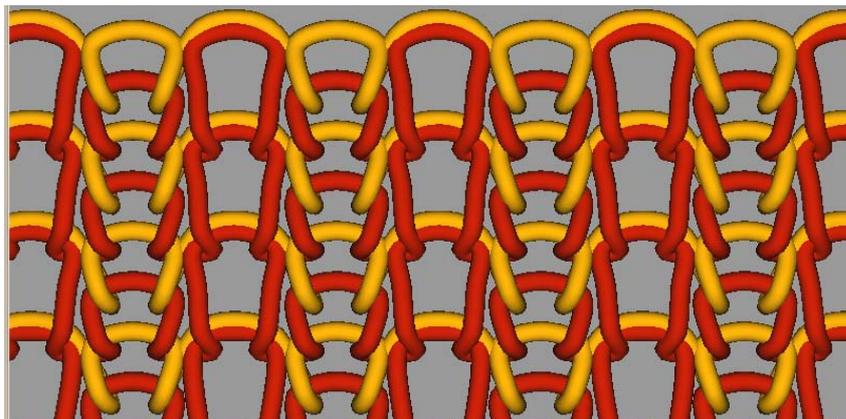


FIG. II.2.20 – Exemple de correction de l'interpénétration des fils grâce aux métacylindre dans un tricot à mailles chargées

Chapitre 3

L'application « Tricot 3D »

Sommaire

3.1 Architecture globale	86
3.2 L'interface Homme-Machine	90
3.3 Implémentation et résultats	92

À chaque étape de cette thèse, nous n'avons pas perdu de vue que l'objectif à atteindre était de concevoir un outil de prototypage virtuel. Cet outil étant destiné à des tricoteurs, nous avons œuvré afin de rendre leur interaction avec le logiciel la plus agréable possible. Par conséquent, plutôt que de définir le liage dans un fichier texte ou xml séparé, ou à l'aide de lignes de commandes, nous avons développé une interface graphique permettant à l'utilisateur de « dessiner » le schéma de liage du tricot qu'il souhaite modéliser.

3.1 Architecture globale

Comme nous l'avons décrit auparavant, la génération du modèle se déroule de la manière suivante :

- analyse du motif (détection d'allongements éventuels)
- création des points de contact en fonction de l'analyse du motif faite précédemment (ces points de contact seront également des points de contrôle pour nos splines)

- détection des « fusions » éventuelles de fils et création des métacylindres
- génération d'une géométrie respectant la topologie (ajout de points de contrôle à partir de nos points de contact pour assurer la position relative des fils au sein du tricot)

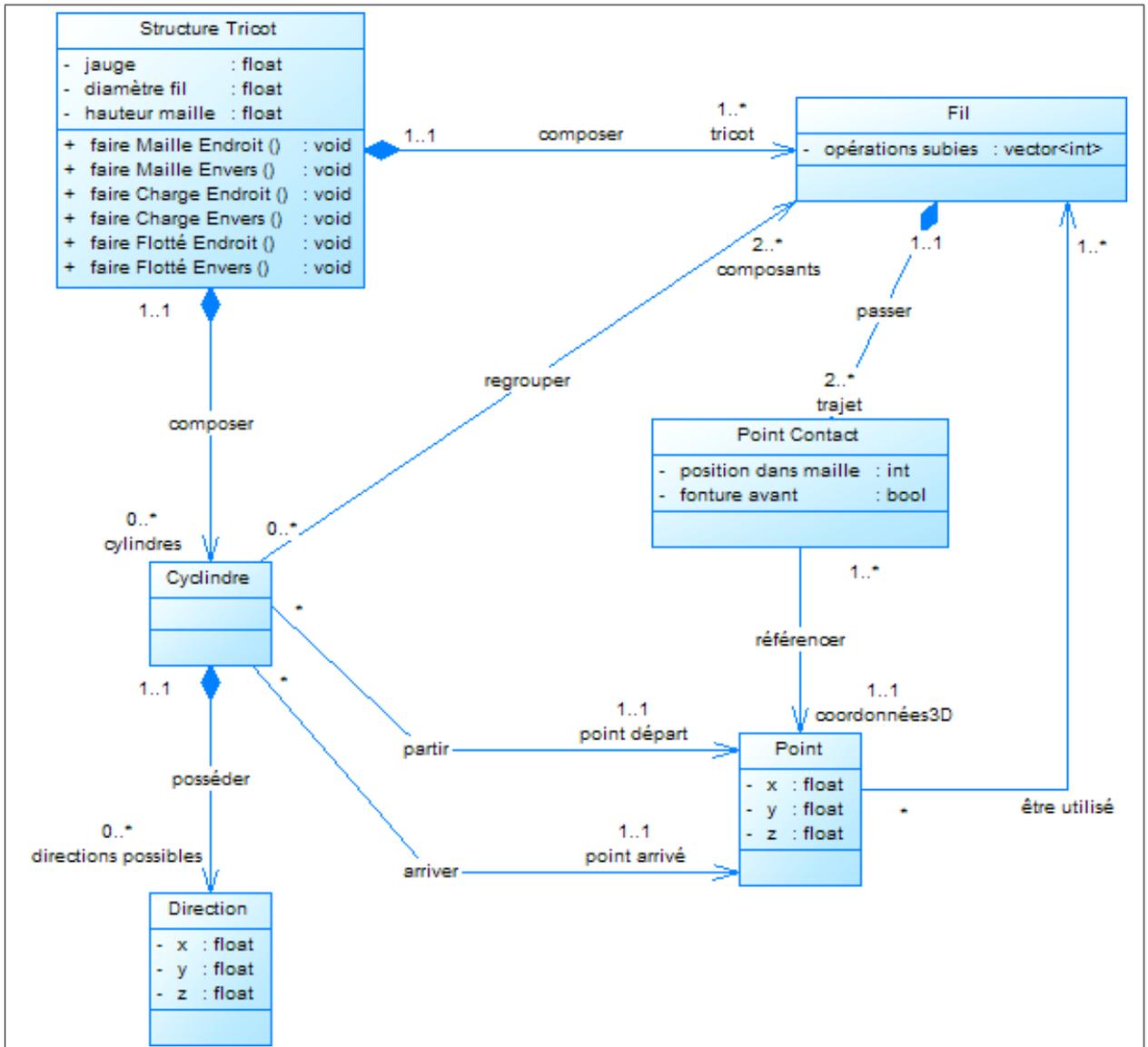


FIG. II.3.1 – Architecture globale du logiciel au format UML

Un **point de contact**¹ est défini par sa position dans la maille, la fonture sur laquelle cette dernière est réalisée et par un pointeur sur le **point** définissant sa position spatiale.

¹les classes du diagramme de classes de la figure 3.1 sont identifiées en gras

En pratique, un **fil** est décrit par la liste des **points de contact** qu'il va parcourir et par la liste des opérations qu'il subit au niveau de chaque aiguille. Ces opérations sont stockées sous forme d'un tableau d'entiers de la taille du nombre d'aiguilles utilisées pour réaliser le tricot. Chaque évolution du motif correspond à un **fil**. Comme nous l'avons évoqué précédemment, plusieurs **files** peuvent se partager un même **point**. La vision informatique de cet état de fait est illustrée par le diagramme de classe de la figure 3.1.

On retrouve bien la possibilité de partage de coordonnées spatiales par plusieurs points de contact. La classe **point** stockera la liste des fils passant par celui-ci ; chaque fil sera associé à la position occupée par le point dans la maille formée par ce fil. Cette structure permettra de détecter les fils qui partagent une séquence de deux points consécutifs nécessitant l'usage de **cylindres**.

Le trajet de chaque **cylindre** sera défini par deux références sur les **points** de départ et d'arrivée de notre méta-cylindre. Il regroupera également la liste des fils qui le composent ainsi que la liste des directions disponibles en cas d'ajout de fil(s) supplémentaire(s).

La **structure globale du tricot** est donnée par la liste des **files** et la liste éventuelle des **cylindres** s'il y a lieu. La classe **Structure Tricot** a comme attribut les caractéristiques techniques de réalisation du tricot telles que la jauge, la hauteur des mailles (normalement ce n'est pas le tricoteur qui choisit ce paramètre, il découle de la LFA mais cela nécessiterait la phase de relaxation) et le diamètre du fil.

L'algorithme 2 décrit l'action générale du logiciel lorsque l'utilisateur a cliqué sur tricoter. Le **motif** est alors une chaîne de caractères. Il est d'abord analysé par notre moteur suivant l'algorithme 1 (cf. chapitre précédent), et on dispose d'une table de booléens de la taille du motif qui détermine pour chaque opération de celui-ci s'il y a allongement de maille.

Les méthodes réalisant les mailles (charges ou flottés) créent les Points de contact et les Fils en fonction de l'opération réalisée et de la présence (ou non) d'allongement. Les Points de contacts et les Fils sont directement ajoutés dans les listes de la classe Structure Tricot. La fonction **Créer Cylindre()** parcourt la liste des Points et crée un Cylindre dès lors que deux points consécutifs sont parcourus par au moins deux fils. Puis, lors de l'appel de **Générer la topologie** on ajoute des points de contrôle à partir de la liste des

Algorithme 2 : Algorithme général de fabrication du modèle

```

1  pour  $k$  allant de 1 à  $nbRepMotif$  faire
2    pour  $j$  allant de 1 à  $nbLigneMotif$  faire
3      pour  $i$  allant de 1 à  $nbAigT$  faire
4        pour chaque caractère du motif faire
5          allongement =  $tabAllongement[j * nbAigMotif + i \% nbAigMotif]$ 
6          suivant  $motif[j * nbAigMotif + i \% nbAigMotif]$  faire
7            cas où  $e$ 
8              faire Maille Envers(allongement);
9            cas où  $g$ 
10             faire Maille Endroit(allongement);
11           cas où  $v$ 
12             faire Charge Endroit(allongement);
13           cas où  $n$ 
14             faire Charge Envers(allongement);
15           cas où  $+$ 
16             faire flotté Envers(allongement);
17           cas où  $-$ 
18             faire flotté Endroit(allongement);
18  Créer Cylindre(); pour chaque Cylindre de Structure Tricot faire
19    Place Fils dans Cylindre ();
20  Générer la topologie();

```

points de contact définissant la topologie du tricot avant de calculer les trajectoires des courbes splines passant par l'ensemble de ces points.

3.2 L'interface Homme-Machine

D'une manière générale, on désigne par Interface Homme-Machine (IHM) l'ensemble des aspects des systèmes informatiques qui influencent la participation de l'utilisateur à des tâches informatisées. Il s'agit en fait de la partie de l'informatique qui s'intéresse aux échanges d'informations entre un utilisateur et un système informatique. Pour les besoins de la modélisation, nous avons créé une interface graphique permettant de dessiner le schéma de liage (en langage « vermicelle ») correspondant au motif que l'utilisateur veut tricoter (Figure 3.2).

On a choisi de décomposer cette interface en trois zones A, B et C dédiées à la préparation du métier en vue du tricotage pour la zone A, au dessin du schéma en langage vermicelle pour la zone B et à la visualisation 3D du modèle à la taille souhaitée pour la zone C. Cette séparation nous semble intuitive car elle place l'élément primordial pour l'utilisateur (le schéma vermicelle) au centre de l'écran, et l'ordre vertical de placement des zones correspond à l'ordre chronologique dans lequel les opérations doivent être réalisées. Le réglage des paramètres se situe lui, classiquement, dans la partie haute de la fenêtre.

Il est à noter que la zone A peut être divisée en trois zones offrant des fonctionnalités importantes :

- La zone de définition de l'aire du motif (choix du nombre d'évolutions et d'aiguilles le composant)
- La zone des boutons de choix des opérations à effectuer sur les aiguilles (le clic sur un bouton le rendra actif et permettra d'aller affecter cette opération à une aiguille en cliquant sur cette dernière)
- La zone de réglage du métier (nombre de fontures, jauge, diamètre du fil . . .)

Sur cette interface, pour dessiner le motif du liage qu'il veut réaliser, l'utilisateur dispose des boutons en haut à gauche de la zone A de notre interface (figure 3.2) représentant les symboles vermicelle des actions à sa disposition. Une fois qu'il a sélectionné une action, l'utilisateur clique sur l'aiguille à laquelle il veut attribuer cette action dans la zone de dessin de l'interface (zone B de la figure 3.2). Il est également possible de choisir la taille

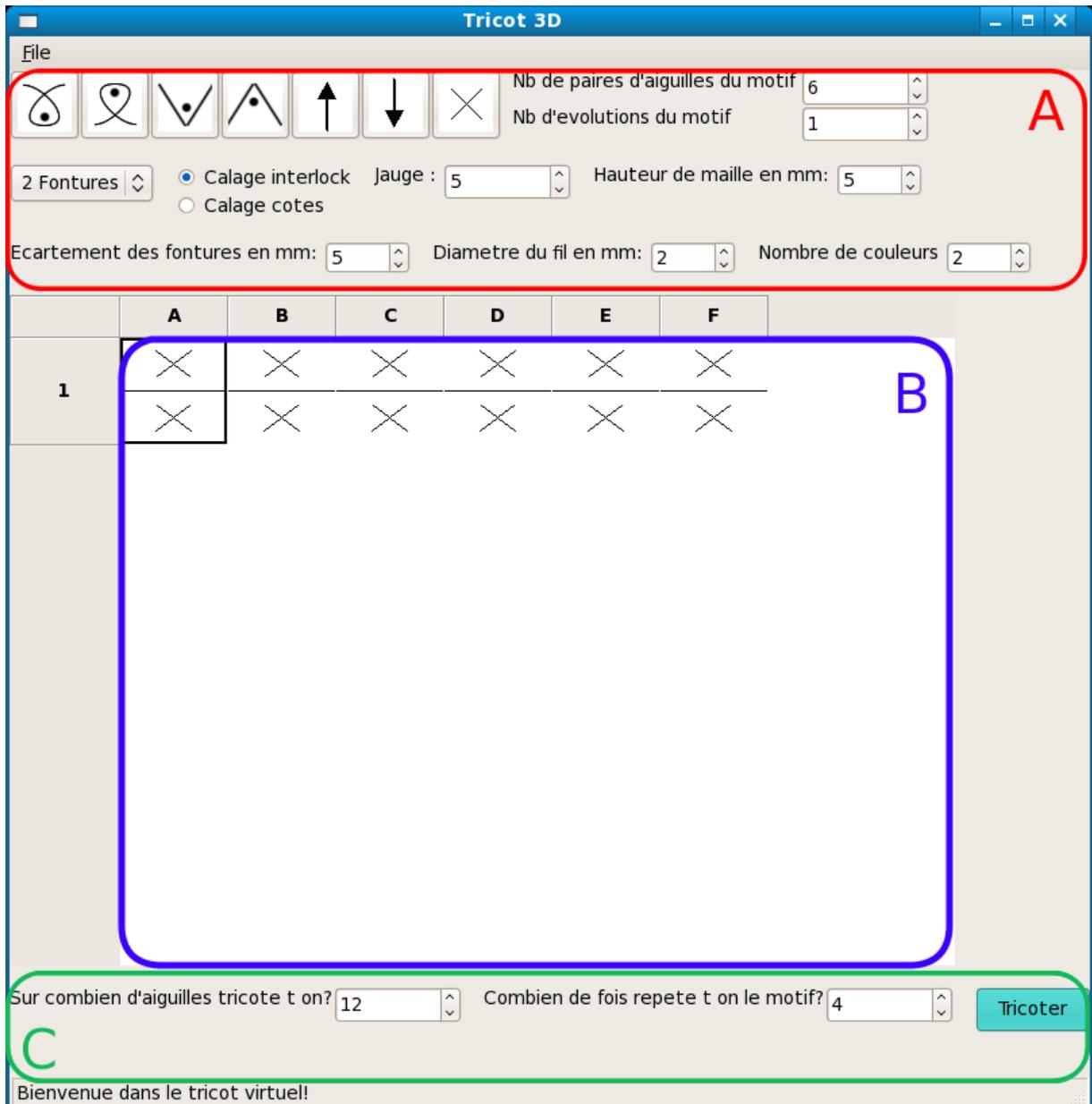


FIG. II.3.2 – Application Tricot 3D

de l'échantillon souhaité et ses paramètres (zone A et C).

L'interface nous fournit ainsi un motif à répéter pour obtenir le tricot. L'utilisateur peut déterminer le nombre de répétitions du motif (horizontalement et verticalement). Lorsque l'utilisateur clique sur « Tricoter » (zone C), le motif est alors traduit en chaîne de caractères et fourni à notre moteur topologique, qui analyse le liage et génère la topologie. Cette dernière est affichée dans une fenêtre OpenGL de visualisation 3D interactive.

Notre modèle géométrique rend donc compte de la topologie du tricot à partir du schéma de liage en langage « vermicelle » réalisé grâce à notre interface. Les différents effets de tricotage tels que charges ou désactivations d'aiguilles, peuvent être générés, comme illustré par des exemples en fin de chapitre. Le réglage des paramètres de réalisation du tricot est également prévu (zone A de la figure 3.2) :

- Choix du nombre de fontures (une ou deux). Choix du calage côte ou interlock (si on tricote sur deux fontures) ; choix disponible seulement quand le nombre de fontures choisi est 2 ; de même les actions sur fonture arrière sont désactivées si le choix du nombre de fontures est 1.
- Réglage de la jauge qui correspond au nombre d'aiguilles par pouce et qui déterminera l'espacement entre deux aiguilles.
- Définition du diamètre du fil.
- Mise au point de l'écart entre les deux fontures du métier à tricoter (très utile pour le spacer 3D).

Les modèles ainsi générés sont visualisables en trois dimensions dans une fenêtre OpenGL. La fenêtre de visualisation est interactive, elle permet de zoomer, déplacer le tissu tricoté et de tourner autour afin de faciliter l'évaluation de la topologie du tricot généré. En outre, si l'utilisateur modifie le schéma de liage dans l'interface, les changements apportés au motif vermicelle sont transposés au modèle 3D en temps réel.

3.3 Implémentation et résultats

Notre logiciel a été développé en C++, en utilisant les bibliothèques OpenGL pour visualiser les résultats obtenus. L'utilisation d'OpenGL offre à l'utilisateur une manipulation aisée du modèle 3D généré et ainsi une bonne vision de sa topologie.

Afin de rester cohérent avec notre ligne de conduite, notre interface graphique a été développée avec la bibliothèque libre WxWidgets laquelle permet un fonctionnement multi-plateformes de notre logiciel de modélisation topologique 3D.

La portabilité du logiciel a été vérifiée puisque nous l'avons développé et testé sous li-

nux et il est utilisé au quotidien sur windows comme outil de formation par nos partenaires de l'IFTH.

La figure 3.3 illustre la topologie obtenue par notre moteur pour un tricot jersey, qui rappelons-le, est le motif le plus simple car il ne comporte que des mailles endroit. Je me

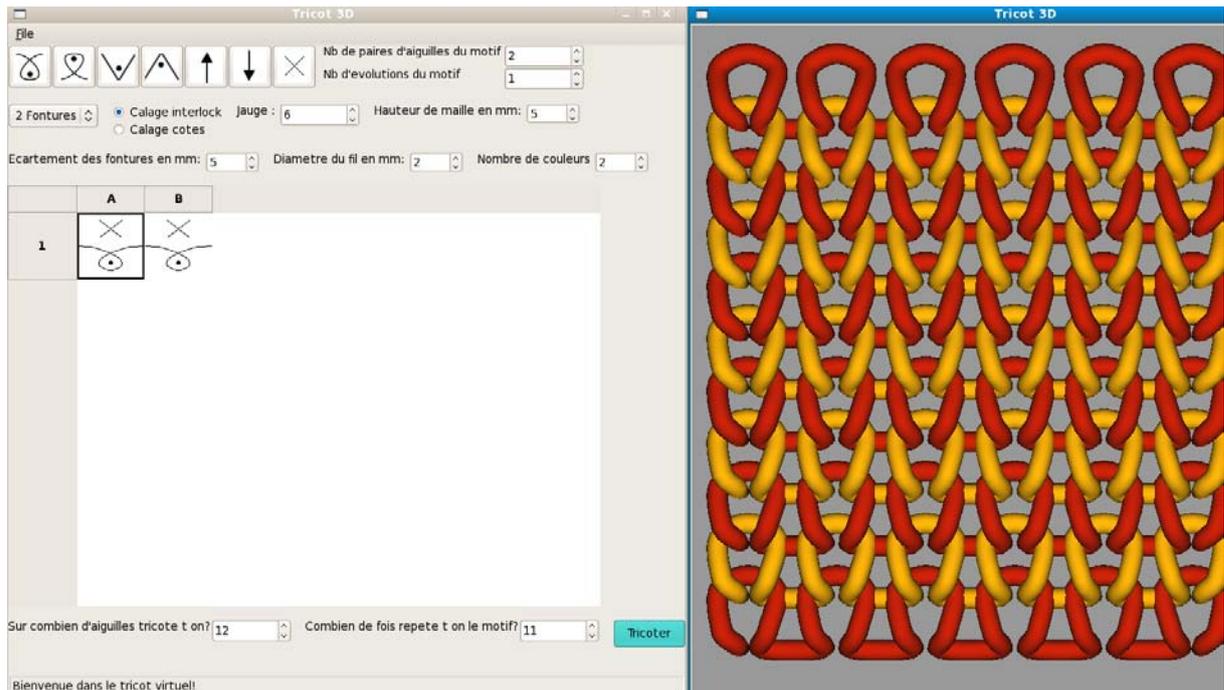


FIG. II.3.3 – Modélisation d'un tricot jersey.

propose donc de fournir quelques résultats obtenus grâce à notre logiciel, sur des liages que nous avons souvent évoqués dans ce manuscrit. Voici donc la topologie que nous générons pour le tricot Interlock (figure 3.4) qui est un des motifs les plus utilisés dans l'industrie de la maille (notamment pour réaliser les T-shirts).

La figure 3.5 met en évidence les fils de charges de la côte anglaise ; on constate qu'il n'y a pas d'allongement de mailles car les deux lignes du motif sont imbricables.

Le dernier exemple (figure 3.6) permet d'exprimer une structure plus compliquée, et dont l'analyse du motif a permis de localiser des allongements de mailles. Ce motif donne lieu en réalité à deux rangées de mailles : la première est le résultat de l'imbrication de l'évolution initiale avec la dernière évolution du motif, alors que la deuxième rangée est issue des deux évolutions intermédiaires. Cet exemple illustre la nécessité de périodicité

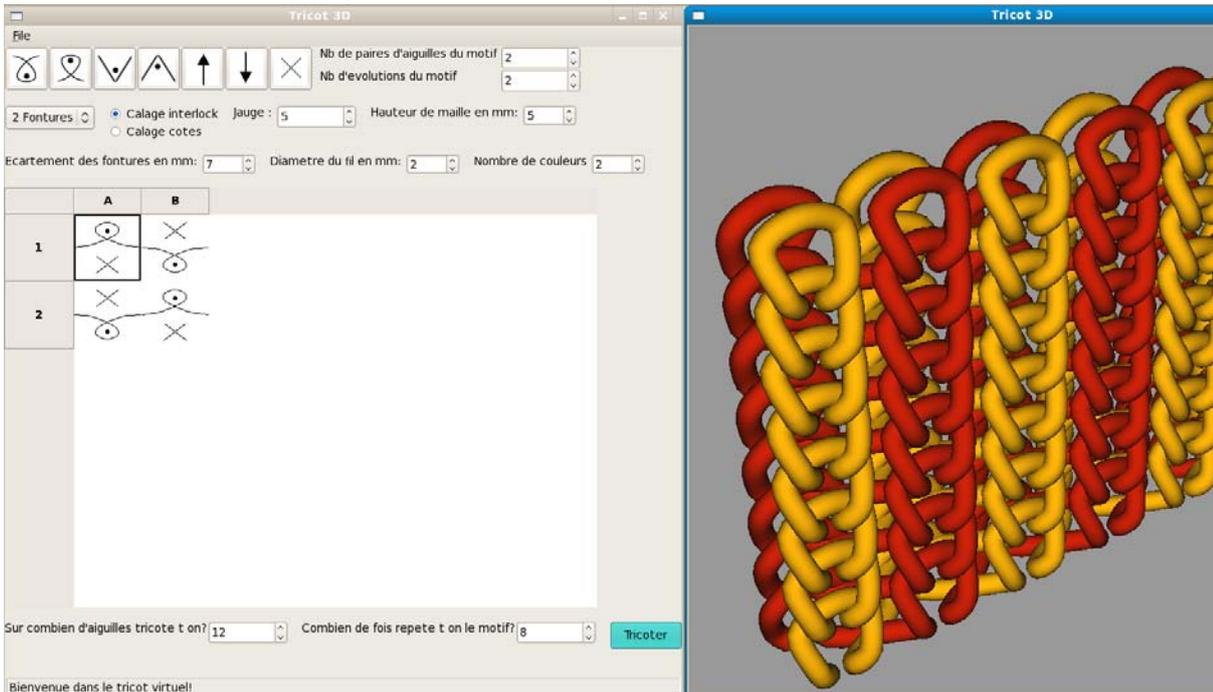


FIG. II.3.4 – Modélisation d'un tricot interlock.

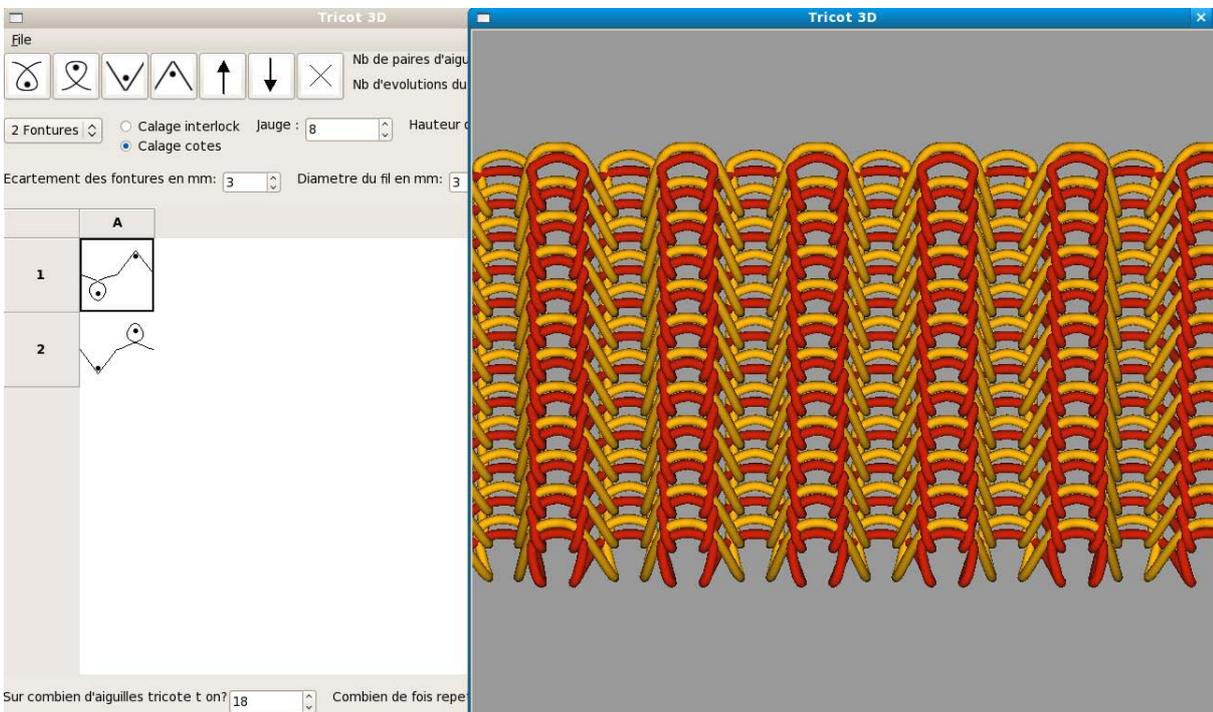


FIG. II.3.5 – Modélisation d'une côte Anglaise.

dans le traitement de motif.

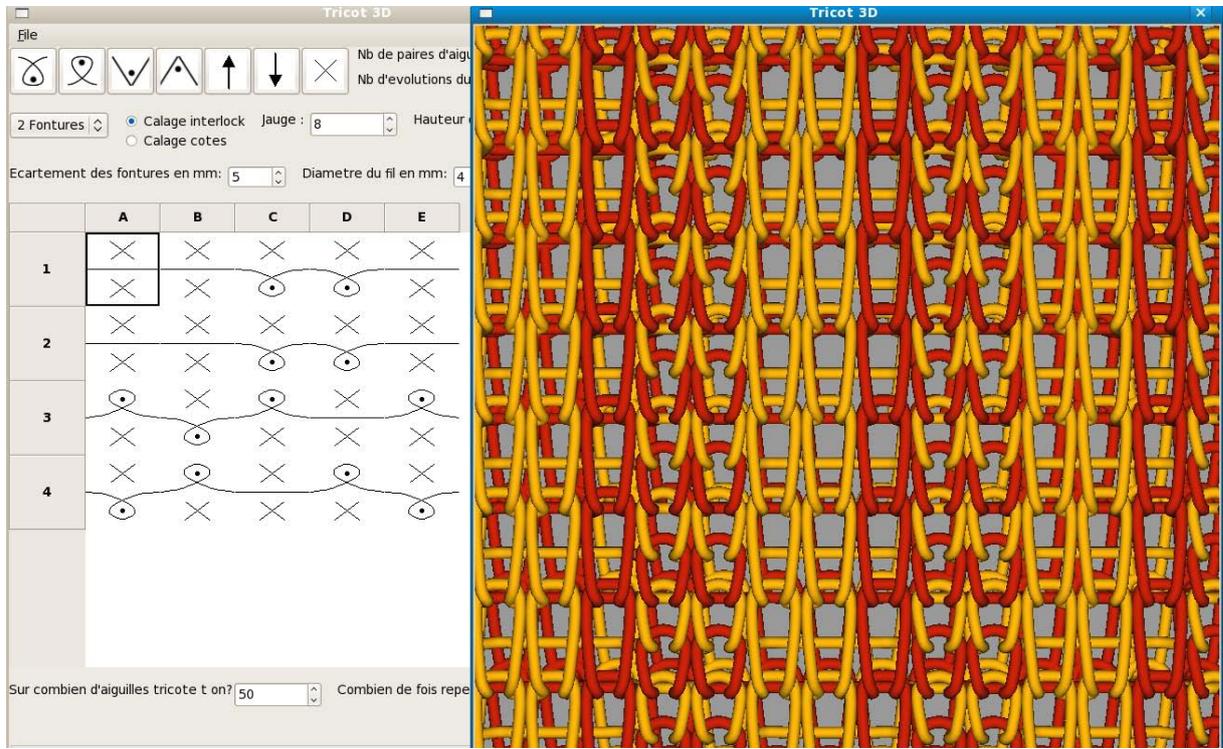


FIG. II.3.6 – Modélisation d'un tricot interlock relié.

Conclusion

L'objectif de cette thèse était de développer un modèle infographique de tricot capable de simuler les caractéristiques géométriques et mécaniques d'une étoffe tricotée. Cet objectif a été en partie atteint : nous disposons d'un modèle géométrique explicite rendant compte de la topologie 3D de tricots à partir de données métier normalisées. Ce modèle est par ailleurs utilisé au quotidien par nos partenaires de l'IFTH, comme outil de formation aux techniques de bonneterie.

Ce travail de thèse, en premier lieu, a débouché sur un ensemble de règles permettant de déterminer les rangées de mailles effectivement générées par n'importe quel schéma de liage. Ce travail a exigé une phase non négligeable d'acquisition des savoir-faire et de l'expertise de nos partenaires.

Cette étape réalisée, nous avons établi une modélisation de la maille à partir des points de contact de celle-ci avec ses voisines. Nous avons défini les points de contact de telle manière qu'ils définissent la topologie complète de l'étoffe. Nous avons également mis en place des méta-cylindres afin de gérer les partages de trajectoires par plusieurs fils ; ces fils seront alors déplacés en fonction de leur ordre d'arrivée dans le tricot et de leur provenance, puis ils seront associés à ce méta-fil les englobant tous en vue d'une réduction de paramétrage lors de la phase de relaxation.

Puis pour faciliter l'utilisation de notre moteur et améliorer la perception de la topologie nous avons développé une interface graphique sur laquelle l'utilisateur peut dessiner le schéma de liage de l'échantillon de tricot qu'il souhaite modéliser. Le résultat de cette modélisation est visualisé dans une fenêtre OpenGL autorisant la manipulation 3D du tricot.

Nous aurions certes souhaité obtenir des résultats sur la partie relaxation mécanique initialement envisagée, mais la modélisation topologique fût une épreuve plus ardue que nous l'avions alors imaginée. La nécessité de recevoir une formation approfondie sur les techniques industrielles de bonneterie (industrie qui m'était totalement inconnue auparavant), était anticipée mais la phase d'extraction de connaissances non formalisées auprès des professionnels de la maille n'avait pas été correctement évaluée et a demandé un nombre conséquent d'itérations dans notre processus de modélisation.

C'est pourquoi, même si nous nous sommes penchés sur la relaxation du tricot, nous

n'avons pas eu le temps de l'intégrer à notre modèle. Deux possibilités s'offrent maintenant à nous :

- Soit simuler la relaxation en cours de tricotage, telle qu'elle a lieu réellement sur les métiers, ce qui permettrait une mise en place plus réaliste de la géométrie de l'état relâché du tricot.
- Soit simuler la relaxation du tricot *a posteriori* en générant d'abord toute la topologie, puis en relâchant petit à petit l'étoffe en commençant par les premières rangées tricotées.

Dans tous les cas, nous aborderons les contacts entre nos fils de manière différente de ce qui a déjà été fait, considérant en effet qu'au cours de la relaxation et en fonction du liage, le fil d'une maille peut glisser au bénéfice d'une (ou plusieurs) de ses voisines. Nous utiliserions alors une méthode de gestion des contacts par contacts glissants (contraintes à variables libres, modèle co-développé par le CReSTIC et le LIFL).

Nous disposons déjà d'un modèle d'énergie interne de fil continu et de contacts glissants, reste donc à assurer le maintien de l'orientation des contacts (cf. les contraintes concernant les plans osculateurs dans l'état de l'art), ce qui est un peu plus délicat dans le cas où nous utiliserions les contacts glissants.

Une autre perspective, partiellement liée à la simulation mécanique, concerne l'aspect des fils lors de la visualisation. Là encore, des pistes ont été explorées mais les développements n'ont pas été finalisés en raison de l'accent mis sur la topologie plutôt que sur le réalisme des images. Nos premiers efforts ont porté sur deux aspects : l'utilisation d'un modèle d'éclairage spécifique aux textiles ([YYTI92]) à l'aide de fragment shaders, et la prise en compte des variations locales d'épaisseur en fonction de la tension des fils et de la pression au niveau des contacts [KAK05] [HGLC97]. Ce second aspect devra être à nouveau considéré lorsque la simulation mécanique sera fonctionnelle.

Enfin, une perspective nouvelle et à très court terme, puisque nous disposons d'écrans stéréoscopiques et autostéréoscopiques, serait de visualiser notre topologie en 3D « relief » avec ou sans lunettes, au lieu de la visualisation actuelle en 3D « à plat ». Cette évolution peut être obtenue très rapidement car nos modèles sont visualisés en OpenGL et nous dis-

posons au sein du laboratoire du savoir-faire pour connecter rapidement des applications OpenGL à ces plate-formes de restitution 3D en relief.

Bibliographie

- [Aus89] Aussenac, N. *Conception d'une méthodologie et d'un outil d'acquisition de connaissances expertes*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1989. (Cité p. 50)
- [AG05] Aussenac-Gilles, N. *Méthodes ascendantes pour l'ingénierie des connaissances*. Habilitation à diriger des recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, décembre 2005. (Cité p. 50)
- [BW98] Baraff, D. et Witkin, A. Large steps in cloth simulation. *In proceedings of SIGGRAPH'98*, pages 43–54, 1998. (Cité p. 8 et 9)
- [BR74] Barnhill, R. et Riesenfeld, R. *Computer Aided Geometric Design*. Academic Press, 1974. (Cité p. 79)
- [Bar81] Barsky, B. *The Beta-spline : a local representation based on shape parameters and fundamental geometric measures*. Thèse de doctorat, Université de l'Utah, 1981. (Cité p. 79)
- [BB83] Barsky, B. et Beatty, J. Local control of bias and tension in beta-splines. *Computer Graphics*, vol. 17, n° 3 : 193–218, 1983. (Cité p. 79)
- [Bez66] Bezier, P. Définition numérique de courbes et surfaces. *Automatisme*, vol. 11 et 12 : 625–632 et 17–21, 1966. (Cité p. 79)
- [Bez77] Bezier, P. *Définition numérique de courbes et surfaces*. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 1977. (Cité p. 79)
- [Bin71] Binford, T. Visual perception by computer. dans *IEEE Conference on Systems and Control*, Miami, 1971. (Cité p. 15)

BIBLIOGRAPHIE

- [BN76] Blinn, J. et Newell, M. Texture and reflection in computer generated images. *Commun. ACM*, vol. 19, n° 10 : 542–547, 1976. (Cité p. 9)
- [BDM94] Breen D.E., H. D. et M.J., W. Predicting the drape of woven clothes using interacting particles. dans *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH'94)*, volume 28, pages 365–372, 1994. (Cité p. 8 et 9)
- [BDP92] Breen D.E., H. D. et P.H., G. A physical-based particle model of woven cloth. *The Visual Computer*, vol. 8 : 264–277, 1992. (Cité p. 8 et 9)
- [BRJ02] Bridson R., F. R. et J., A. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation. *In proceedings of SIGGRAPH'02*, pages 594–603, 2002. (Cité p. 8)
- [BRR03] Bridson R., M. S. et R., F. Simulation of clothing with folds and wrinkles. *SCA'03 Proceedings, Eurographics Association*, vol. 32 : 28–36, 2003. (Cité p. 8)
- [CR74] Catmull, E. et Rom, R. A class of local interpolating splines. *Computer Aided Geometric Design*, 1974. (Cité p. 10, 63 et 79)
- [CPNNR06] Chalенçon-Piotin, S., Nocent, O., Nourrit, J.-M., et Remion, Y. A virtual prototyping tool for knitwear simulation. dans *Industrial Simulation Conference 2006*, University of Palermo, Palermo, Italy, jun 2006. (Cité p. 3)
- [CPNR05] Chalенçon-Piotin, S., Nourrit, J.-M., et Remion, Y. Modélisation de mailles complexes : Vers un logiciel de prototypage virtuel. dans *Groupe de Travail Animation & Simulation 2005*, Lille, may 2005. (Cité p. 3)
- [CPNR08] Chalенçon-Piotin, S., Nourrit, J.-M., et Remion, Y. Prototypage virtuel de la topologie et la géométrie de textiles tricotés : Outil cao pour la maille. *Soumis à REFIG, en cours d'évaluation*, 2008. (Cité p. 4)
- [DCG⁺74] Dieng, R., Corby, O., Giboin, A., Golebiowska, J., et Matta, N. *Méthodes et outils pour la gestion des connaissances*. Dunod, 1974. (Cité p. 50)
- [Doy53] Doyle, P. Fundamentals aspects of the design of knitted fabrics. *Journal of the Textile Institute*, vol. 44 : 561–578, 1953. (Cité p. 29)

-
- [EMS00] Eberhardt, B., Meissner, M., et Strasser, W. Knit fabrics. pages 123–144, 2000. (Cité p. 9)
- [EWS96] Eberhardt, B., Weber, A., et Strasser, W. A fast, flexible, particle-system model for cloth draping. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 16, n° 5 : 52–59, 1996. (Cité p. 9)
- [Fey86] Feynman, C. Modeling the appearance of cloth, master’s thesis. Rapport de DÉA, Massachusetts Institute of Technology, 1986. (Cité p. 8)
- [Gag83] Gagalowicz, A. *Vers un modèle de texture*. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 1983.
- [GLH⁺97] Grishanov, S., Lomov, S., Harwood, R., Cassidy, T., et Farrer, C. The simulation of the geometry of two-components yarns. part i : The mechanics of strand compression : Simulating yarn cross-section shape. *Journal of the Textile Institute. Part 1, Fibre science and textile technology*, vol. 88, n° 2 : 118–131, 1997.
- [GRS95] Gröller, E., Rau, R., et Straßer, W. Modeling and visualization of knitwear. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 1, n° 4 : 302–310, 1995. (Cité p. 7)
- [HGLC97] Harwood, R., Grishanov, S., Lomov, S., et Cassidy, T. Modelling of two-component yarns. part i : The compressibility of yarns. *Journal of the Textile Institute. Part 1, Fibre science and textile technology*, vol. 88, n° 4 : 373–384, 1997. (Cité p. 99)
- [HZG⁺97] Harwood, R., Z., L., Grishanov, S., Lomov, S., et Cassidy, T. Modelling of two-component yarns. part ii : Creation of the visual images of yarns. *Journal of the Textile Institute. Part 1, Fibre science and textile technology*, vol. 88, n° 4 : 385–399, 1997.
- [HRWL83] Hayes-Roth, F., Waterman, D., et Lenat, D. An overview of expert systems. dans Hayes-Roth, F., Waterman, D. A., et Lenat, D. B., éditeurs, *Building Expert Systems*, pages 3–29. Addison-Wesley, 1983. (Cité p. 50)

BIBLIOGRAPHIE

- [KJS08] Kaldor J., J. D. et S., M. Simulating knitted cloth at the yarn level. dans *ACM Transactions on Graphics (TOG), SIGGRAPH 2008*, 2008. (Cité p. 9)
- [Kaw80] Kawabata, S. The standardization and analysis of hand evaluation. *Textile Machinery Soc. Of Japan*, 1980. (Cité p. 9)
- [KB84] Kochanek, D. et Bartels, R. Interpolating splines with local tension, continuity and bias control. *Computer Graphics*, vol. 18, n° 3 : 33–41, 1984. (Cité p. 79)
- [KD91] Krivine, J. et David, J. L'acquisition des connaissances vue comme un processus de modélisation : méthodes et outils. *Intellectica*, n° 12 : 101–137, 1991. (Cité p. 50)
- [KAK05] Kyosev, Y., Angelova, Y., et Kovar, R. 3d modeling of plain weft knitted structures of compressible yarn. *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. 9, n° 1 : 88–97, 2005. (Cité p. 99)
- [ME98] Meißner, M. et Eberhardt, B. The art of knitted fabrics, realistic and physically based modelling of knitted patterns. *Proceedings of Eurographics '98*, vol. 17, n° 3 : 191–209, 1998. (Cité p. 7 et 65)
- [Mun59] Munden, D. The geometry and dimensional properties of plain-knit fabrics. *Journal of the Textile Institute*, vol. 50 : 448–471, 1959. (Cité p. 29)
- [Ney95] Neyret, F. A general and multiscale model for volumetric textures. dans Davis, W. A. et Prusinkiewicz, P., éditeurs, *Graphics Interface '95*, pages 83–91", 1995. (Cité p. 7)
- [Noc01] Nocent, O. *Animation dynamique de corps déformables continus. Application à la simulation de textiles tricotés*. Thèse de doctorat, Université de Reims, 2001. (Cité p. 3, 10, 14 et 15)
- [Nou99] Nourrit, J.-M. *Modélisation, animation et visualisation de textiles à base de mailles*. Thèse de doctorat, Université de Reims, 1999. (Cité p. 2, 10, 12 et 15)
- [PH89] Perlin, K. et Hoffert, E. Hypertexture. *Computer Graphics*, vol. 23, n° 3 : 253–262, 1989. (Cité p. 7)

-
- [Pie91] Piegl, L. On nurbs : a survey. *Computer Graphics and Applications*, vol. 11, n° 1 : 55–71, 1991. (Cité p. 79)
- [Pro95] Provot, X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. *In Proceedings Graphics Interface'95*, pages 147–154, 1995. (Cité p. 8)
- [RNG99] Remion, Y., Nourrit, J.-M., et Gillard, D. Dynamic animation of spline like objects. dans *Winter School in Computer Graphics and Visualization*, pages 426–432, Plzen, Czech Republic, 1999. (Cité p. 12)
- [RNN00] Remion, Y., Nourrit, J.-M., et Nocent, O. Dynamic animation of n-dimensional deformable objects. dans *Winter School in Computer Graphics and Visualization*, pages 147–154, Plzen, Czech Republic, feb 2000. (Cité p. 12)
- [Rie73] Riesenfeld, R. *Applications of B-spline approximation to geometric problems of Computer Aided Design*. Thèse de doctorat, Université de Syracuse, 1973. (Cité p. 79)
- [SP86] Sederberg, T. et Parry, S. Free-form deformation of solid geometric models. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 20, n° 4 : 151–160, 1986. (Cité p. 11)
- [SCM⁺07] Soares, R., Claparède, B., Marbach, C., Foucher, M.-C., Calisti, A., et Trocmé, J. Le textile en chiffres. Rapport technique, Ministère de l'économie, des Finances et de l'Industrie, Sessi : Centre d'enquêtes statistiques, 2007.  dition 2007. (Cité p. 2)
- [TDK87] Terzopoulos D., Platt J., B. A. et K., F. Elastically deformable models. *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH'87)*, vol. 21 : 205–214, 1987. (Cité p. 8)
- [Vin92] Vince, J. *3D Computer Animation*. Addison-Weisley Publishing Company, 1992. (Cité p. 11)
- [VT00] Volino, P. et Thalmann, N. Implementing fast cloth simulation with collision response. *Computer Graphics International Proceedings*, pages 257–266, 2000. (Cité p. 8 et 9)

BIBLIOGRAPHIE

- [Whi80] Whitted, T. An improved illumination model for shaded display. *Commun. ACM*, vol. 23, n° 6 : 343–349, 1980. (Cité p. 15)
- [XCL⁺01] Xu, Y., Chen, Y., Lin, S., Zhong, H., Wu, E., Guo, B., et Shum, H. Photorealistic rendering of knitwear using the lumislice. dans *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 391–398, 2001. (Cité p. 10)
- [YYTI92] Yasuda, T., Yokoi, S., Toriwaki, J., et Inagaki, K. A shading model for cloth objects. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 12, n° 6 : 15–24, 1992. (Cité p. 9 et 99)