



**HAL**  
open science

# Contribution à l'étude de tissus multicouches : CAO et propriétés mécaniques

Moussa Alali

► **To cite this version:**

Moussa Alali. Contribution à l'étude de tissus multicouches : CAO et propriétés mécaniques. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2012. Français. NNT : 2012MULH8493 . tel-01249557

**HAL Id: tel-01249557**

**<https://theses.hal.science/tel-01249557v1>**

Submitted on 4 Jan 2016

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

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

Référence N° :

Année 2012

# UNIVERSITE DE HAUTE-ALSACE (UHA)

École Doctorale Jean-Henri Lambert (ED - 494)

École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace (ENSISA)

Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT)

## THÈSE

Pour obtenir le titre de docteur en mécanique

Par

**Moussa ALALI**

**CONTRIBUTION À L'ETUDE DE TISSUS MULTICOUCHES :**

**CAO ET PROPRIETES MECANIQUES**

**18 Décembre 2012**

**Membres du jury :**

<b>Pr. Manuel José SANTOS SILVA</b>	Université de Beira Interior, Portugal	Rapporteur
<b>Pr. Jean RENAUD</b>	INSA , Strasbourg, France	Rapporteur
<b>Dr. Bernard VERMEULEN</b>	ENSAIT, Roubaix, France	Examineur
<b>Pr. Artan SINOIMERI</b>	ENSISA , Mulhouse, France	Examineur
<b>Dr. Sabri MOURAD</b>	Albany International, France	Invité
<b>Pr. Jean-Yves DREAN</b>	ENSISA , Mulhouse, France	Directeur de thèse



# REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT, EAC 7189 CNRS), à l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace (ENSISA), de l'Université de Haute-Alsace (UHA) à Mulhouse en France.

Tout d'abord, je tiens à remercier **la Fondation Spiegel** pour son soutien financier, **l'entreprise NEXIS** pour nous avoir fourni les fils de Polyamides gratuitement et **l'entreprise COBRA Europ** d'avoir accepté la réalisation des tests au sein de son entreprise.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur **Jean-Yves DREAN**, qui, en tant que Directeur de thèse, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Mes remerciements s'adressent également à **Mme Agnès SCHWOB**: secrétaire du LPMT, pour sa générosité, son écoute et la grande patience dont elle a su faire preuve malgré ses charges professionnelles.

J'adresse mes plus sincères remerciements au **Prof. Artan SINOIMERI** pour son aide, sa gentillesse et ses informations dans l'analyse statistique.

Je remercie **Dr. Sabri MOURAD**, Directeur de Recherches à l'ALBANY International, d'avoir accepté de participer au jury.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes de l'ENSISA rencontrées surtout les personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Mes chaleureux remerciements vont directement aux personnes qui ont partagé au plus près cette aventure avec moi, celles qui ont été ma motivation permanente : ma vie **Zilal**, merci pour son amour, sa patience, sa compréhension et son soutien sans égal au cours de ces années. Gros bisous à mon cœur **Limar** et mes yeux **Ahmad et Ziad**

Je n'oublie pas de présenter mes plus sincères remerciements à **mes parents**, je n'ai qu'à prier pour que Dieu vous donne le bonheur et le contentement, Dieu vous protège.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes amis syriens, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.





## SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	III
<b>Liste des figures :</b> .....	XI
<b>Liste des tableaux</b> .....	XV
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
1. Historique du textile et des vêtements .....	1
2. L'industrie textile .....	1
3. Problème posé .....	2
4. Structure du mémoire .....	3
<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION AU TISSAGE ET AUX STRUCTURES TEXTILES TISSEES</b> .....	5
1. Introduction au tissage : .....	7
2. Classification des armures : .....	11
3. Classification des structures textiles tissées : .....	12
4. Tissus multiples:.....	14
4.1. Étoffe multiple liée :.....	14
4.1.1 Tissu double couches liée : .....	15
4.1.2 Tissu triple couches .....	23
<b>CHAPITRE 2 CONCEPTION DE TEXTILE ASSISTEE PAR ORDINATEUR</b> .....	25
1. Introduction à la Conception Assisté par l'Ordinateur (CAO): .....	27
2. Le CAO/FAO dans l'industrie textile : .....	27

3. Textiles à usage techniques : .....	30
.4 Conception des armures assistée par ordinateur CAAO : .....	30
5. CAAO pour un tissu double couches : .....	32
5.1. CAAO pour un tissu double couche lié par chaînes spéciales : .....	33
5.1.1 Identification mathématique des armures : .....	34
5.1.2 Génération mathématique des armures: .....	35
5.1.3 Matrice d'ordre de proportions des chaînes : .....	40
5.1.4 Insertion des fils dans la matrice de double étoffe : .....	42
5.1.5 Levées de fils : .....	47
5.1.6 Génération des points de liage possibles : .....	51
5.2. Description du module programmatique : .....	55
5.3. Conclusion : .....	56
6. CAAO pour un tissu triple couches : .....	57
6.1. CAAO pour un tissu triple couche auto- lié: .....	57
6.2. Description du module programmatique : .....	58
6.2.1 Identification mathématique des armures: .....	58
6.2.2 Génération mathématique des armures .....	60
6.2.3 Insertion des éléments de la matrice définitive du tissu triple : .....	64
6.2.4 Levées de fils : .....	66
6.2.5 Génération des points de liage possible : .....	69

6.2.6 Description du module programmatique :	71
6.2.7 Conclusion :	72
7. Auto-génération des armures de liage pour un tissu triple lié par la chaîne de la couche intermédiaire :	73
7.1. Définitions :	73
7.2. Génération de la combinaison des points de liage :	75
7.3. Génération de la matrice de liage $P_{I,J}$ :	77
7.4. Exemples de démonstration:	80
7.4.1 Exemple de démonstration 1:	82
7.4.2 Exemple de démonstration 2:	87
7.5. Description de programmation :	94
8. Conclusion.....	95
<b>CHAPITRE 3 TISSAGE MULTICOUCHE</b> .....	<b>97</b>
1. Le métier à tisser étroit: .....	99
2. Préparation au tissage : .....	102
2.1. Les fils :.....	102
2.1.1 Caractérisation des fils .....	102
2.2. Alimentation de la machine à tisser .....	106
2.3. Encantrage : .....	107
2.4. Rentrage et piquage au peigne:.....	108

3. Propriétés mécaniques et paramètres de construction de tissu: .....	110
4. Armures des couches : .....	111
5. Armure de liage : .....	113
5.1. Génération des armures de liage.....	113
5.2. Classification des armures de liage.....	115
5.2.1 La méthode du moment d'inertie .....	115
5.2.2 La méthode du plus proche voisin : .....	119
5.2.3 Choix des armures de liage : .....	123
6. Duitage :.....	124
7. Conclusion.....	125
<b>CHAPITRE 4      EXPERIMENTATION</b> .....	<b>127</b>
1. Introduction à la méthode des plans d'expériences .....	129
2. Les logiciels de plan d'expériences : .....	132
3. Application de la méthode des plans d'expériences pour le tissu étudié:.....	133
3.1. Définition de l'objectif, les réponses et les facteurs:.....	133
3.2. Construction de plan d'expérience : .....	135
3.3. Expérimentation: Propriétés physiques et mécaniques des tissus [65].....	137
3.3.1 Embuvage et retrait.....	137
3.3.2 Masse surfacique.....	139
3.3.3 Perméabilité .....	140

3.3.4 Test de compression – épaisseur .....	142
3.3.5 Test de flexion .....	144
3.3.6 Test de cisaillement.....	148
3.3.7 Test de traction .....	154
3.4. Analyse statistique .....	157
3.4.1 Analyse en composantes principales .....	157
3.4.2 Analyse de variance:.....	163
4. Conclusion.....	169
<b>CHAPITRE 5      CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>171</b>
1. Conclusions .....	173
2. Perspectives.....	176
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>177</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>187</b>
ANNEXE 1.....	188
ANNEXE 2.....	191
ANNEXE 3.....	201
<b>Lexique .....</b>	<b>206</b>



## Liste des figures :

Figure 1.1 : Principe du tissage.....	7
Figure 1.2 : Schéma d'un métier à tisser.....	9
Figure 1.3 : Exemple d'armure.....	9
Figure 1.4 : Les coupes en chaîne et en trame.....	10
Figure 1.5 : Classes d'armures.....	11
Figure 1.6 : Différentes structures tissés complexes.....	13
Figure 1.7 : Les différentes représentations d'un tissu double couche.....	15
Figure 1.8 : Représentation imbriquée du tissu double étoffe, proportion en chaîne (1.E/2.e) et en trame (1.E/1.e).....	16
Figure 1.9 : Représentation imbriquée du tissu double étoffe non lié, proportion en chaîne (1.E/2.e) et en trame (1.E/1.e).....	17
Figure 1.10 : Modes d'assemblage.....	19
Figure 1.11 : Tissu double étoffe lié.....	19
Figure 1.12 : Liage par chaîne supplémentaire.....	20
Figure 1.13 : Armure du tissu double étoffe lié par chaînes supplémentaires.....	22
Figure 1.14 : Armure du tissu triple couches non liées.....	24
Figure 1.15 : Tissu triple étoffe liée par différents modes de liage.....	24
Figure 2. 1 : Interface du logiciel Ned-Graphics [26].....	29
Figure 2. 2: Interface d'une conception d'un tissu par le logiciel Pointcarré [25].....	29
Figure 2. 3 : Schéma en 3D d'une structure technique par le logiciel : ScotWeave [28].....	30
Figure 2. 4: Représentation graphique et mathématique d'une armure.....	31
Figure 2. 5: Double étoffe liée par une chaîne de liage.....	34
Figure 2. 6: Représentation mathématique des armures.....	35
Figure 2. 7: Double étoffe liée par une chaîne de liage dans l'ordre « E. e. FL ».....	42



Figure 2. 8: L'interface d'identification et de la conception du tissu double couche .....	55
Figure 2. 9: L'interface de génération des points de liage pour la double étoffe.....	56
Figure 3. 1 : Armure du tissu triple couches non liées.....	59
Figure 3. 2: Représentation mathématique des armures du tissu triple couches.....	60
Figure 4. 1 : Armure du tissu triple couche, avec tous les points de liage possibles.....	80
Figure 4. 2: L'interface du logiciel pour générer une armure du tissu triple couche .....	95
Figure 5. 1 : Le métier à tisser MÜLLER - NCE .....	99
Figure 5. 2: Composition de la chaîne à maillons.....	100
Figure 5. 3: La planche et la chaîne-dessin.....	101
Figure 5. 4 : Répartition des lames en forme « V », guide de montage de chaîne d'armure..	101
Figure 5. 5: La combinaison des pignons .....	102
Figure 5. 6: Les sens de torsion .....	103
Figure 5. 7: Test de flexion sur 10 fils.....	105
Figure 5. 8: Dispositif de test de flexion KES FB2 .....	105
Figure 5. 9: Éprouvettes de 60 fils parallèles .....	105
Figure 5. 10: Test de flexion sur 60 fils.....	106
Figure 5. 11 : Encantrage et montage des ensouples .....	108
Figure 5. 12: Différents modes de rentrage.....	109
Figure 5. 13: Rentrage pour un tissu triple couche.....	110
Figure 5. 14: Les trois armures choisies .....	112
Figure 5. 15: Les armures de liages générés par le logiciel pour les armures données.....	114
Figure 5. 16: Représentation cubique du tissu triple.....	116

Figure 5. 17: Les moments d'inertie pour les armures de liage.....	117
Figure 5. 18: Regroupement des armures de liage selon leur effet .....	118
Figure 5. 19 : Armures de liage A et B avec les motifs étendus.....	118
Figure 5. 20: Répartitions des points sur une surface.....	119
Figure 5. 21: Exemple de méthode du plus proche voisin .....	121
Figure 5. 22: les armures de liage et l'indice de dispersion correspondant .....	122
Figure 5. 23: Les armures des tissus et leurs armures de liage.....	123
Figure 5. 24: Les armures définitives .....	126
Figure 6. 1 : L'espace expérimental, le point expérimental et le domaine d'étude .....	130
Figure 6. 2: Représentation du Plan factoriel à 3 facteurs à 2 niveaux .....	132
Figure 6. 3 : L'espace expérimental.....	135
Figure 6. 4 : Les mesures d'embuvage et de retrait.....	138
Figure 6. 5 : Masses surfaciques mesurées et calculées en fonction de duitage .....	139
Figure 6. 6 : Air Perméability Tester FX 3300 .....	140
Figure 6. 7 : Les mesures Perméabilité .....	141
Figure 6. 8 : Courbe de pression.....	143
Figure 6. 9 : Test de compression .....	143
Figure 6. 10 : Principe du cantilever [67] .....	145
Figure 6. 11 : Le flexomètre fabriqué.....	146
Figure 6. 12 : Mesure de la longueur de flexion .....	146
Figure 6. 13 : La rigidité en fonction du duitage .....	147
Figure 6. 14 : Module d'Young en fonction du duitage .....	147
Figure 6. 15 : Bias Extension Test [78].....	149
Figure 6. 16 : Picture Frame Test [74] .....	150

Figure 6. 17 : Cisaillement simple, KES FB1 de Kawabata.....	150
Figure 6. 18 : Comportement des tissus en cisaillement (angle faible)- Kawabata.....	151
Figure 6. 19 : Comportement des tissus en cisaillement (angle faible)-Bias Extension Test...	151
Figure 6. 20 : La rigidité de cisaillement en fonction du duitage.....	152
Figure 6. 21 : Comportement des tissus en cisaillement .....	153
Figure 6. 22 : Angle de blocage .....	153
Figure 6. 23 : Dynamomètre LLOYD LR 100K de chez COBRA.....	155
Figure 6. 24 : La force de rupture.....	156
Figure 6. 25 : Allongement maximale .....	156
Figure 6. 26 : Énergie de rupture .....	156
Figure 6. 27 : Module d'Young .....	156
Figure 6. 28 : Histogramme des VP .....	158
Figure 6. 29 : Cercles de corrélation.....	160
Figure 6. 30 : Interprétation des cartes des produits .....	161
Figure 6. 31 : Cartes des produits.....	162

## Liste des tableaux

Tableau 1. 1 : Ordre de rentrage des chaînes en séquence «E : FL : e» .....	40
Tableau 1. 2: Ordre de rentrage des chaînes en séquence «E : e: FL» .....	41
Tableau 1. 3: Contraintes de levée des fils.....	48
Tableau 1. 4: Conditions de liage .....	52
Tableau 2. 1 : Titre des fils de chaîne et de trame .....	103
Tableau 2. 2: Torsion des fils de chaîne et de trame .....	104
Tableau 2. 3: Étude dynamométrique des fils de chaîne – 940 dtex.....	104
Tableau 2. 4: Étude dynamométrique des fils de trame – 470 dtex.....	104
Tableau 2. 5: Test de flexion sur les fils de chaîne et de trame .....	106
Tableau 2. 6 : Nombre de possibilités de liage .....	113
Tableau 3. 1 : Identification des facteurs .....	134
Tableau 3. 2: Le tableau du plan d'expérience carré latin .....	136
Tableau 3. 3 : Variation dimensionnelles après relaxation .....	141
Tableau 3. 4 : Perméabilité après relaxation .....	142
Tableau 3. 5: Épaisseur après relaxation.....	144
Tableau 3. 6 : Impact des différents facteurs.....	164
Tableau 3. 7 : Coefficients des modèles statistiques .....	166
Tableau 3. 8 : Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs théoriques –Partie 1.....	166
Tableau 3. 9 : Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs théoriques –Partie 2.....	167
Tableau 3. 10 : Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs théoriques –Partie 3.....	167
Tableau 3. 11 : Valeurs maximales et minimales théoriques .....	168
Tableau 3. 12 : Comparaison des valeurs de la masse surfacique et de la perméabilité .....	168



# **INTRODUCTION GENERALE**



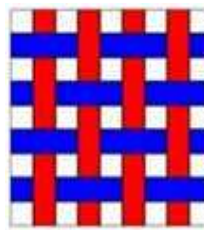
## 1. Historique du textile et des vêtements

Le textile et les vêtements ont joué un rôle important dans l'histoire de l'humanité, le port de vêtements est une caractéristique exclusivement humaine. Le développement de la fabrication des textiles et des vêtements dans la préhistoire a fait l'objet d'un certain nombre d'études scientifiques depuis la fin du 20e siècle. Ces sources ont contribué à fournir une histoire cohérente de ces développements préhistoriques. Les preuves suggèrent que les êtres humains peuvent avoir commencé de porter des vêtements il y a 100000 à 500000 ans.

Les premiers textiles connus sont originaires du Proche-Orient et ont été identifiés comme étant des tissus tissés à la main, tissus destinés à envelopper les morts. Ces tissus sont datés d'environ 6000 ans avant J-C.

On a retrouvé à Yuyao, Zhejiang en Chine les fragments de métiers à tisser les plus anciens datés d'environ 4000 avant J-C.

Le premier entrecroisement (armure) utilisé était la toile, entrecroisement le plus simple caractérisé par une succession de pris et de laissé



La toile

## 2. L'industrie textile

Entre 1810 et 1840, le développement d'un marché textile international a incité à augmenter la production et à imposer un changement dans les méthodes de fabrication. Ainsi la production manuelle a progressivement été remplacée par une production industrielle.



Puis, au cours du 20ème siècle l'industrie du textile de l'habillement et de l'ameublement a progressivement évolué pour répondre aux besoins des autres industries. Ainsi sont apparus les textiles à usage industriels dit « textile techniques ».

Concomitamment, les constructeurs de métiers à tisser ont fait évoluer leur machines en intégrant de nouvelles technologies, telles que l'électronique et l'informatique.

Au cours de la révolution industrielle, la production des tissus a été mécanisée avec des machines alimentées par des roues hydrauliques, puis des machines à vapeur.

Avec la révolution informatique et eu égard à l'utilisation de tissus pour des applications techniques autres que l'habillement et l'ameublement, la production de tissus a été automatisée et des machines à commande numérique ont été développées, ce qui a nécessité le développement des systèmes de CAO qui permettent de gérer la production de ces machines nouvelles.

### **3. Problème posé**

Les tissus complexes utilisés pour des applications techniques sont la plupart du temps composés de plusieurs couches liées entre elles. Les systèmes de CAO courants ne permettent que de concevoir et de décrire des tissus destinés à l'habillement et l'ameublement. Certains systèmes spécifiques sont destinés à la conception de tissus plus techniques mais aucun d'entre eux n'est capable de générer automatiquement les liaisons entre les couches selon un taux de liage prédéfini.

Le travail présenté dans le présent mémoire de thèse s'attachera à résoudre ce problème en formalisant les liaisons entre les couches et le taux de liage, ce qui permettra d'écrire un logiciel générant automatiquement le liage entre les couches pour un taux de liage prédéfini.

Ce problème ayant trouvé une solution, dans un deuxième temps, en se fondant sur les outils développés, on étudiera les variations de propriétés mécaniques d'un tissu triple couches en fonction de plusieurs paramètres, dont le liage, ceci dans le but de faire ressortir les paramètres les plus influents.

## **4. Structure du mémoire**

Le mémoire de thèse est structuré de la manière suivante :

### **Chapitre 1 : Introduction au tissage et aux structures textiles tissées**

Dans ce chapitre, nous présentons le processus de tissage, les différents entrecroisements, les structures textiles tissées dont les tissus multicouches liées. Deux types de tissus multicouches présentés dans ce chapitre sont : le tissu double couche et le tissu triple couche, ainsi que les modes de liage entre les couches.

### **Chapitre 2 : Conception de textiles assistée par ordinateur**

Dans ce chapitre, nous introduisons l'évolution de système de CAO dans l'industrie textile, puis nous développerons des modules mathématiques programmables pour des tissus double et triple couches. Le premier module concerne la génération automatiquement d'un tissu double couches liées par des chaînes supplémentaires en générant le maximum de points de liage. Le deuxième module générera automatiquement un tissu triple couches liées par des chaînes de la couches intermédiaire avec le maximum de points de liage. Le troisième module traitera de la génération automatique de toutes les armures de liage d'un tissu triple couches suivant un taux de liage prédéfini. Des logiciels sont développés en se fondant sur ces modules.

### **Chapitre 3 : Tissage multicouches**

Dans ce chapitre, nous exposerons le métier à tisser Muller NCE destiné au tissage multicouches, la préparation au tissage, la caractérisation des fils, le choix les armures et les duitages. Une nouvelle approche fondée sur la méthode du plus proche voisin est présentée pour classer les armures de liage selon l'indice de dispersion des points de liage. Enfin nous proposerons de tisser 27 tissus différents : Trois armures (A, B et C), trois liages (L1, L2 et L3) et trois duitages (16, 20 et 24)

#### **Chapitre 4 : Expérimentation**

Dans ce chapitre, nous exposerons la méthode des plans d'expériences et le logiciel JMP utilisé pour analyser les résultats. Puis une série de tests sur les tissus triple couches est réalisée pour évaluer leur propriétés mécaniques et physiques (traction, flexion, cisaillement, embuvage, retrait, perméabilité, masse surfacique,....etc.).

À l'aide du logiciel JMP, trois types d'analyses des résultats sont effectués : l'analyse des composantes principales, analyse de variance et le poids des paramètres pour déterminer les paramètres qui ont plus d'influence sur les propriétés du tissu. Grâce à ces analyses, un modèle mathématique théorique est obtenu pour prédire les propriétés des tissus triple couches liés.

#### **Chapitre 5 : Conclusions et perspectives**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une conclusion générale et la proposition de quelques perspectives.

#### **Chapitre 6 : Annexes**

Dans ce chapitre, nous présentons les annexes relatives aux différents chapitres de mémoire.

# **CHAPITRE 1**

## **INTRODUCTION AU TISSAGE ET AUX STRUCTURES TEXTILES TISSEES**



## 1. Introduction au tissage :

Le tissage par définition, est l'opération qui permet de produire des tissus par l'entrecroisement, dans un même plan, de deux séries de fils perpendiculaires entre elles [1] [2], (figure 1.1).

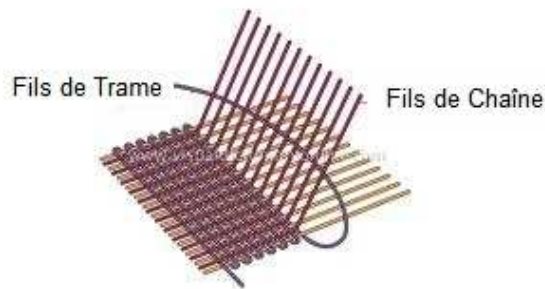


Figure 1.1 : Principe du tissage

Ces deux séries des fils sont :

La **chaîne** : qui est l'ensemble des fils parallèles aux bords du tissu (**lisières**) et à son sens d'avancement sur le métier à tisser. Les fils de chaîne se désignent par le mot « fils ». Le nombre de fils de chaîne d'un tissu par un centimètre est appelé « **le compte** ».

La **trame** : qui est l'ensemble des fils perpendiculaires à la chaîne. Les fils de trames sont désignés par le mot « **duite** » lorsqu'ils sont insérés dans le tissu. Le nombre de duites insérés dans le tissu par un centimètre est appelé « **le duitage** ».

Cette opération s'effectue sur un métier à tisser. La figure 1.2 représente **un métier à tisser à cadres** réduit à ses éléments essentiels, où les fils de chaîne sont enroulés parallèlement les uns aux autres sur un cylindre (1) appelé (**ensouple**) supporté à l'arrière du métier et ils sont séparés en deux nappes (4) l'une levée (**la nappe supérieure**) et l'autre baissée (**la nappe inférieure**), formant un angle suffisamment ouvert (**foule**), pour que la trame puisse y être introduite à l'aide d'un système d'insertion de trame (**navette, aiguilles, lances rigides ou flexibles, jet d'eau, jet d'air, ou projectiles à pinces**).

Les fils de chaîne doivent être déviés et maintenus dans un plan bien déterminé à l'aide d'un **porte-fils** (2), puis ils doivent être encroisés sur deux baguettes (3) appelées **baguettes d'envergures**.

Cette opération d'**envergure** se fait en passant les fils impairs au-dessous de la première baguette et en dessus de la seconde baguette et en disposant les fils pair au-dessus de la première et en dessous de la seconde.

Ensuite, les fils de chaîne sont insérés individuellement dans un ordre déterminé (**rentrage ou remettage**) au travers des œillets des organes appelés (**lisses**) groupées dans des **cadres** (5) et forment le corps de **rentrage**. Tous les fils reliés aux lisses d'un même cadre ont, à tout instant, la même position dans la foule et par conséquent auront la même croisure à l'intérieur du tissu.

Le mouvement de lève et de baisse des cadres ou « la formation de foule » est donné par des organes mécaniques spéciaux (**comes, ratière, chaîne d'armure**) en cas des métiers à lames [3], ou par un système électromécanique en cas des métiers Jacquard où chaque fil est commandé individuellement par un petit moteur pas à pas.

Après le rentrage des fils, tous les fils de chaîne traversent (soit individuellement, soit par groupe) dans un ordre déterminé les dents du **peigne** (7) dont l'un de ses rôles est de distribuer régulièrement les fils de chaîne dans la largeur d'exécution du tissu. Cette opération est appelée « **piquage au peigne** ».

Le peigne est supporté et entraîné par **le battant** (6) qui se déplace en mouvement de va-et-vient dans l'intervalle existant entre les cadres et le tissu. Grâce à ce mouvement et entre deux passages de duites, le peigne tasse la duite au niveau de point de façade et assure une bonne cohésion au tissu final.

Au fur et à mesure du tissage, l'étoffe s'enroule sur un cylindre appelé **rouleau de toile** (11), disposé en avant du métier à tisser et entraîné régulièrement par un appareil appelé **régulateur** (10) composé de séries de pignons et de roues dentées ou d'un moteur pas à pas. La poitrinière (9) est chargée de ramener le tissu dans le plan vertical, tandis que **les templets**

(8) assurent le maintien en largeur du tissu et éviter le phénomène de retrait du tissu dû au liage des fils de chaîne et trame.

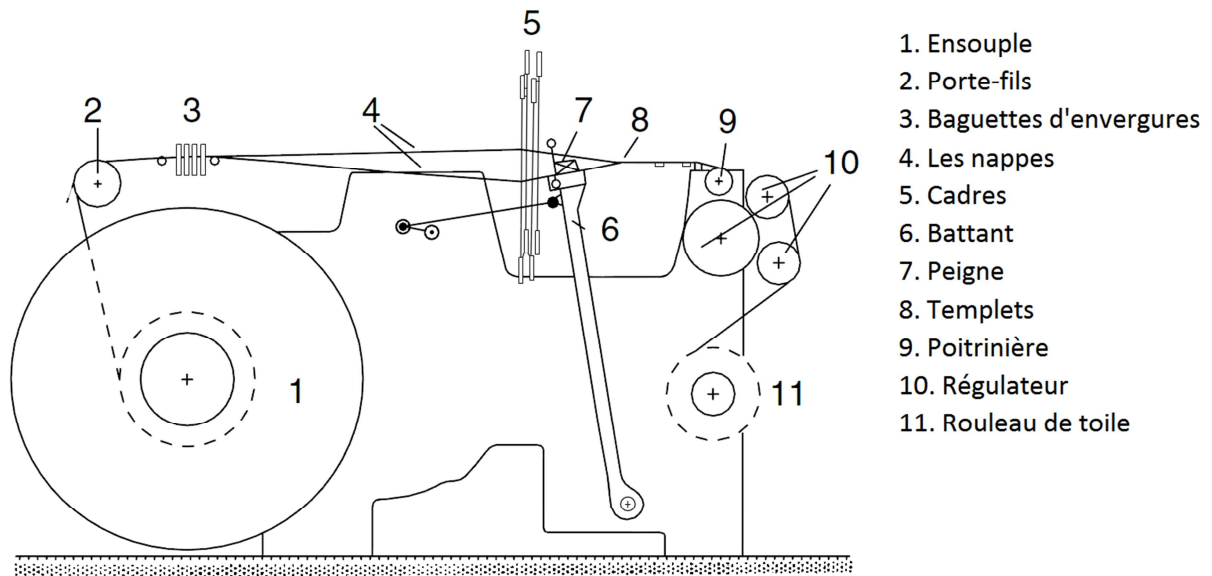


Figure 1.2 : Schéma d'un métier à tisser

Les fils de chaîne passent soit au-dessus de la trame, soit en-dessous, d'après un ordre déterminé par un dessin technique appelé **armure**, (Figure 1.3).

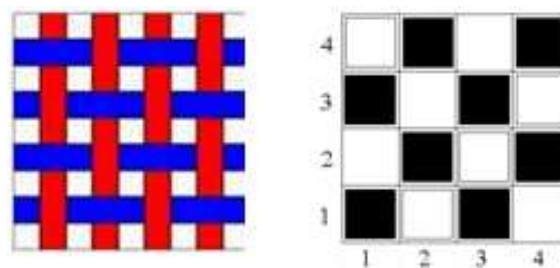


Figure 1.3 : Exemple d'armure

L'armure est dessinée sur un papier quadrillé selon des lignes perpendiculaires pour donner des carreaux [4]. L'intervalle entre deux lignes verticales représente un fil de chaîne tandis que l'intervalle entre deux lignes horizontales représente un fil de trame (ou une duite), les fils de chaîne sont numérotés de gauche à droite tandis que les fils de trames sont numérotés de bas en haut [5][6]. Les carreaux représentent les points d'entrelacement des fils de chaîne et des fils de trame.



On distingue deux modes d'entrelacement entre les chaînes et les trames :

- **un pris** : c'est un fil de chaîne qui passe au-dessus du fil de trame et est représenté par des carrés pleins.
- **une laissé** : c'est un fil de chaîne qui passe en-dessous du fil de trame et est représenté par des carrés vides.

L'aspect du tissu et ses caractéristiques dépendent fortement de l'armure choisie, mais aussi d'autres paramètres tels que la grosseur des fils (**titre**), la torsion des fils utilisés et la densité des fils par centimètre dans les deux sens chaîne et trame (**compte et duitage**).

L'armure est caractérisée par le **rapport d'armure** qui est déterminé par le nombre minimal de fils de chaîne définissant la période du motif dans le sens transversal (**rapport en chaîne**), et par le nombre minimal de fils de trame définissant la période du motif dans le sens longitudinal (**rapport en trame**). Les deux rapports en chaîne et en trame peuvent être égaux ou inégaux selon la nature du motif voulu [7].

Des coupes des fils dans les deux sens longitudinal et transversal d'un tissu (**coupe en chaîne** et **coupe en trame**) sont utiles pour montrer clairement les liaisons entre les fils dans le tissu (figure 1.4), en particulier dans les structures tissées complexes.

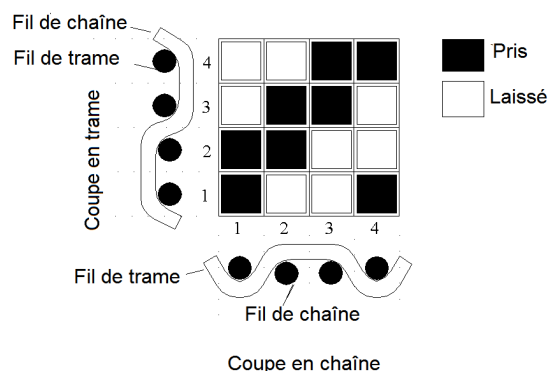


Figure 1.4 : Les coupes en chaîne et en trame

Dans certains motifs ou armures, la portion d'un fil de chaîne ou de trame qui s'allonge par-dessus de deux ou plusieurs duites ou fils de chaîne adjacents se désigne par le mot « **flotté en chaîne** » ou « **flotté en trame** ».

## 2. Classification des armures :

On distingue trois grandes classes fondamentales d'armures: la toile, les sergés et les satin [7][2], (Annexe 1). Il existe aussi un nombre indéfini d'armures dérivées de ces trois armures de base [2] . La figure 1.5 montre différentes classes d'armures.

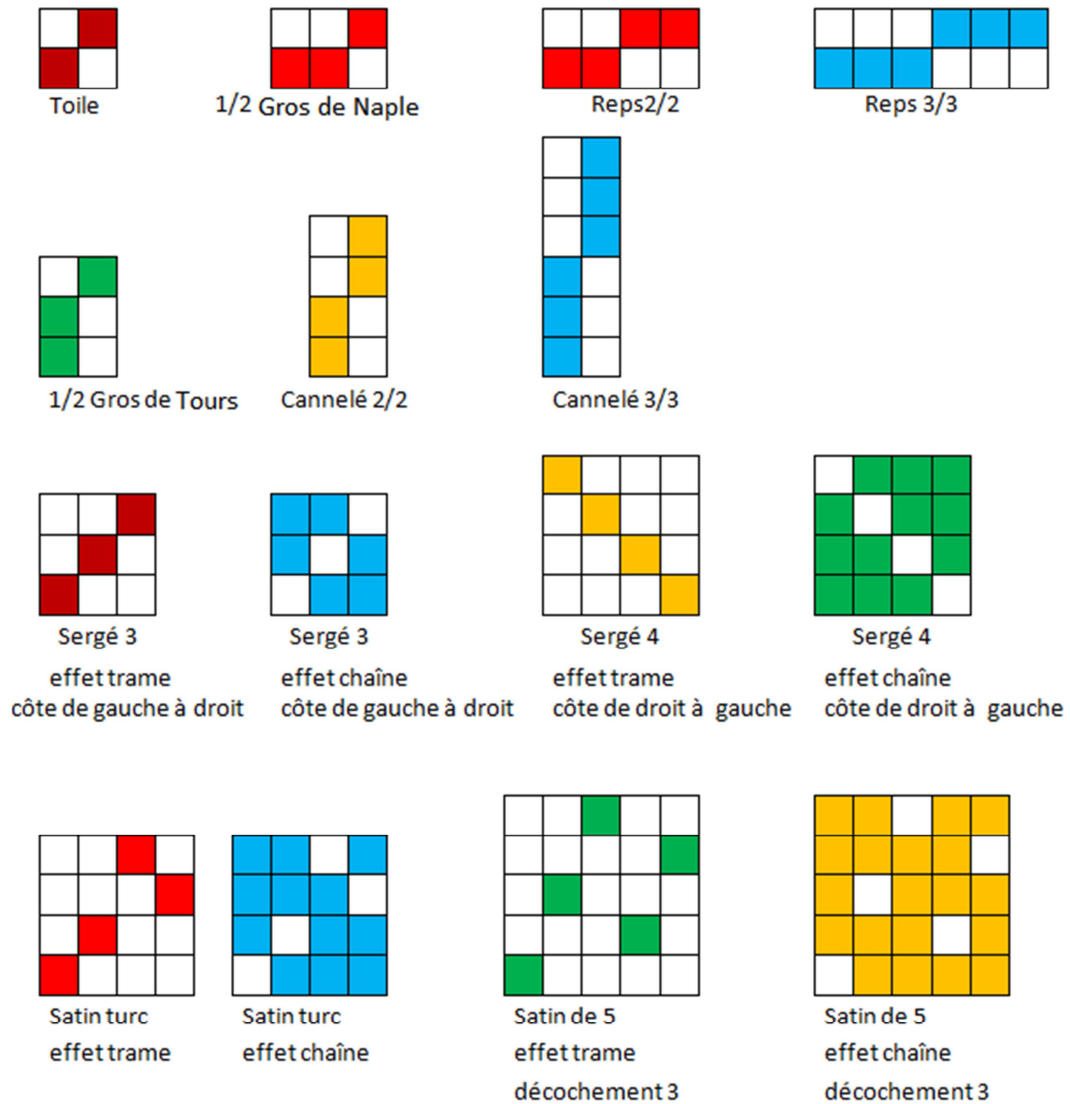


Figure 1.5 : Classes d'armures

### **3. Classification des structures textiles tissées :**

Les technologies de fabrication de textiles surfaciques ou volumiques sont fondées sur quatre grandes familles de procédés de transformation des fils: le tissage, le tricotage, le tressage et la technique de fabrication des non-tissés [8].

On distingue deux grandes classes de structures textiles tissées auxquelles s'ajoutent plusieurs sous classes possibles [9]:

#### **1. Structures textiles traditionnelles ou tissus traditionnels :**

Textiles pour lesquels on porte l'attention sur l'apparence et le confort. Il s'agit surtout du domaine de la mode, souvent du vêtement, mais aussi de l'ameublement (draps, tentures, rideaux, nappes, serviettes, tapisseries,.....,etc.).

#### **2. Structures textiles technique ou tissus techniques :**

Dans cette catégorie sont classées toutes structures textiles pour lesquelles importent les caractéristiques mécaniques, chimiques et physico-chimiques, et ayant une application technique : géotextile, textile médical, matériaux composites pour renforts textiles.

On peut aussi classer les structures textiles d'après la complexité de leurs structures et leur nombre de couches dont la structure tissée est composée. On distingue deux grandes classes [5][10]:

#### **1. Structures tissées simples :**

Ils sont composés d'une seule série de chaîne et une seule série de trame, entrecroisées perpendiculairement et elles forment une étoffe à une couche unique.

#### **2. Structures tissées complexes :**

Un tissu complexe peut être composé d'une ou plusieurs séries de chaîne et de trame, entrecroisées de façon à former plusieurs tissus simples superposés et reliés entre eux par des

accrochages ou « points de liage » de façon à ne former qu'un seul corps. Sous cette catégorie, on peut mentionner les structures tissées suivantes [11] , (figure 1.6):

- Tissu double face : double face par la chaîne et double face par la trame
- Tissu multicouches ou multiples: tissu double étoffes, triple étoffes, quadruple étoffes, tissu tubulaire, tissu-poches ...etc.
- Tissu double parois, Tissus à entrelacement d'angle ou à entrelacement multicouches, Tissu orthogonal 3D, tissu triaxial 3-D, ..., etc. [12] .

Dans ce travail nous allons aborder la conception des armures assistées par ordinateur pour des tissus complexes (tissu double couches et triple couches pour des applications techniques) et étudier les propriétés mécaniques et physiques des tissus triples couches.

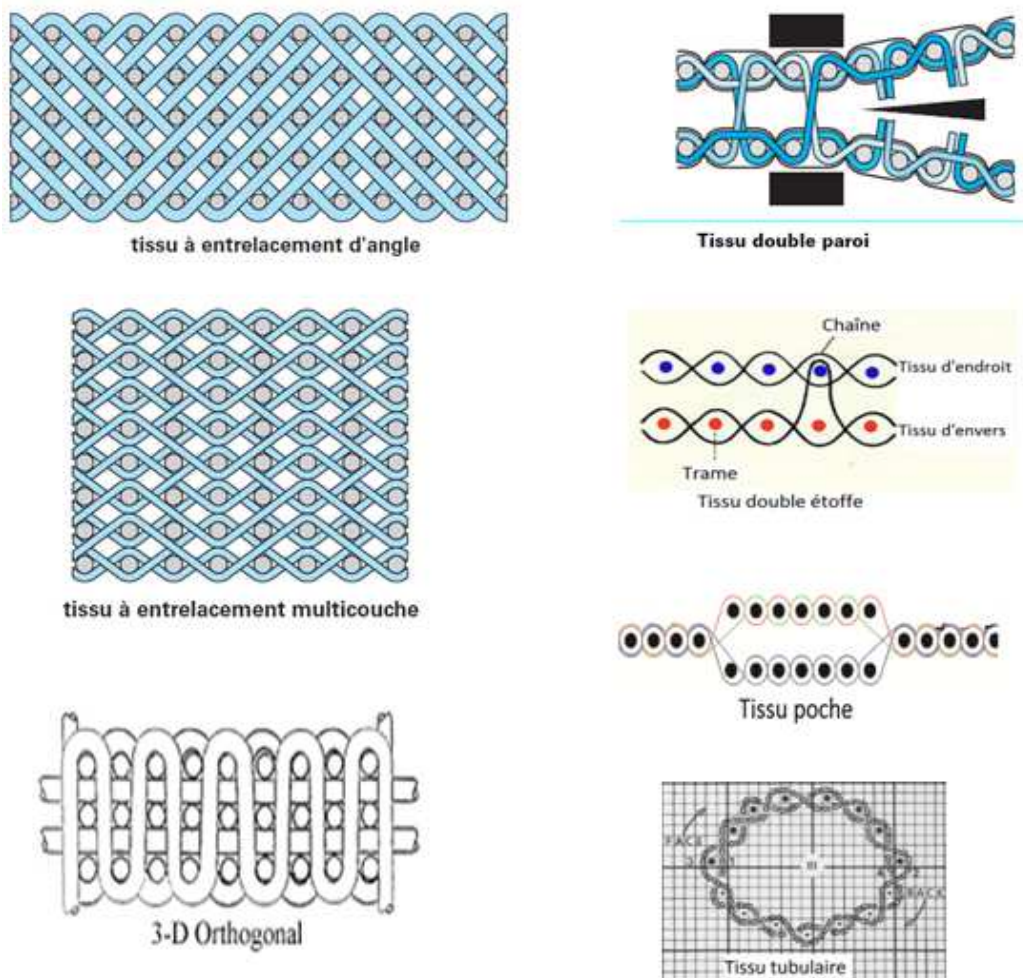


Figure 1.6 : Différentes structures tissées complexes

#### **4. Tissus multiples:**

Par définition, ce sont des étoffes composées de tissus superposés, tissés simultanément de façon à ne former qu'un seul corps dont chaque couche est formée d'une chaîne et d'une trame. Ces couches sont liées entre elles par différentes façons :

- Par les lisières : on obtient une étoffe multiple tubulaire.
- Par interversion des tissus : on obtient un tissu-poche.
- Par des points de liage nombreux et régulièrement disposés : on obtient une étoffe multiple liée.

La figure 1.6 donne un exemple de ces tissus multiples.

##### **4.1. Étoffe multiple liée :**

Un tissu multiple lié est composé au moins de deux étoffes distinctes, liées par des points d'assemblage nombreux de façon à faire de l'ensemble une seule étoffe solide et épaisse.

Le rôle des points de liage est de lier ensemble les différentes couches d'un tissu multiple et parfois de décorer aussi la surface de tissu. Les points de liage peuvent être visibles ou invisibles selon le domaine d'utilisation du tissu. Dans tous les cas, les points de liage ne doivent pas modifier la texture des tissus en laissant sur chaque face du tissu le moins de trace possible. L'aspect esthétique de l'étoffe exige de chercher le maximum de sympathie dans les armures qui les forment. Par contre, dans certains cas, la sympathie entre les deux n'est pas obligatoire mais son observation donne des facilités pour l'assemblage [13].

Ces points peuvent être distribués de façon aléatoire ou régulière selon des armures prédéfinies. Généralement le choix de ces points se fait en fonction des armures en présence et des caractéristiques des fils (titre et couleur).

Dans notre recherche, on va plus particulièrement traiter le sujet de l'assemblage entre les différentes couches qui forment les tissus multiples à double étoffe et à triple étoffe.

### 4.1.1 Tissu double couches liée :

Un tissu double étoffe est composé de deux étoffes distinctes, qui sont rattachées l'une à l'autre de façon à faire une seule étoffe solide et épaisse.

Généralement, pour représenter la double étoffe liée, on doit distinguer deux types de tissu : le tissu d'endroit symbolisé « E » et le tissu d'envers symbolisé « e », qui pourraient être totalement différents (l'armure, la nature et la couleur des fils, le titre...etc.) ou identiques [13]. Dans ce type de tissu double couche, on aura peut-être deux faces complètement différentes.

Les évolutions du tissu d'endroit sont représentées par des carrés pleins, et celles du tissu d'envers par d'autres signes comme si la couche supérieure n'existait pas.

La figure 1.7 montre une représentation par transparence vue de l'endroit et une représentation imbriquée d'un tissu double couche non lié, proportion en chaîne (1.E/1.e) et en trame (1.E/1.e). L'armure d'endroit est en sergé 4 et de rapport 4, tandis que l'armure d'envers est en croisé 4 et de rapport 4.

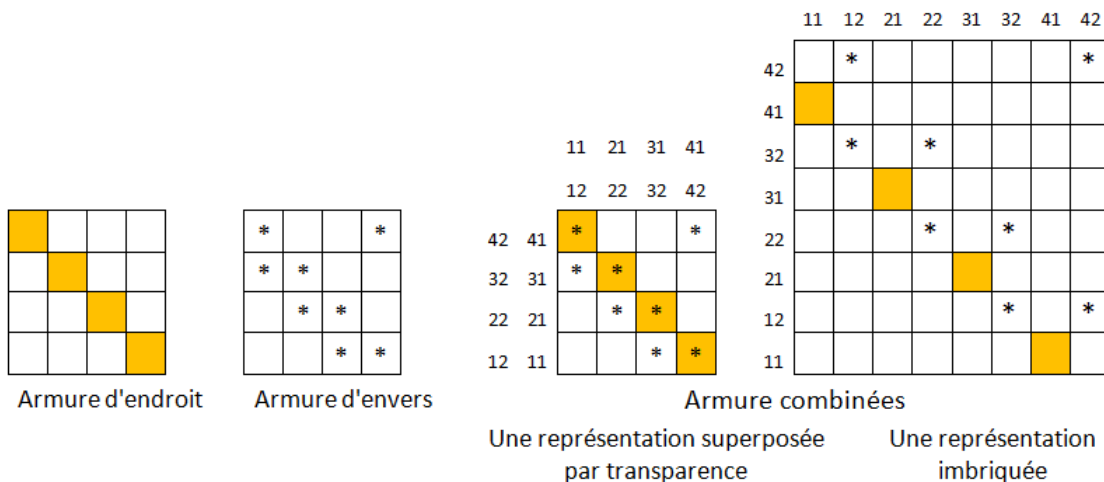


Figure 1.7 : Les différentes représentations d'un tissu double couche

La modalité de positionnement des fils (chaîne et trame) de chaque couche dans le tissu est réalisée selon les spécifications du tissu. Les éléments d'endroit et d'envers peuvent être distribués dans des différentes proportions égales ou inégales dans le tissu.

Par exemple, pour un tissu double couche, si on a une proportion en chaîne « 1.E/2.e » (proportion inégale) et proportion en trame « 1.E/1.e » (proportion égale), ce qui signifie que les chaînes du tissu d’endroit et du tissu d’envers sont disposés dans la proportion de deux fils de chaîne pour le tissu d’envers et un fil de chaîne pour le tissu d’endroit. Tandis que les fils de trame du tissu d’endroit et du tissu d’envers sont placés alternativement du ratio 1 pour chaque tissu. Quand les deux tissus sont combinés pour former l’armure de double étoffe, une extension de l’armure du tissu d’envers dans le sens transversal sera faite dû à la proportion en chaîne (2.e), puis on combine les deux armures (l’armure du tissu d’endroit et l’armure étendue du tissu d’envers) pour produire l’armure du tissu double étoffe. Le tissu illustré dans la figure 1.7 est de proportion en chaîne (1.E/1.e) et en trame (1.E/1.e) tandis que la figure 1.8 montre le même tissu mais de proportion en chaîne (1.E/2.e) et en trame (1.E/1.e)

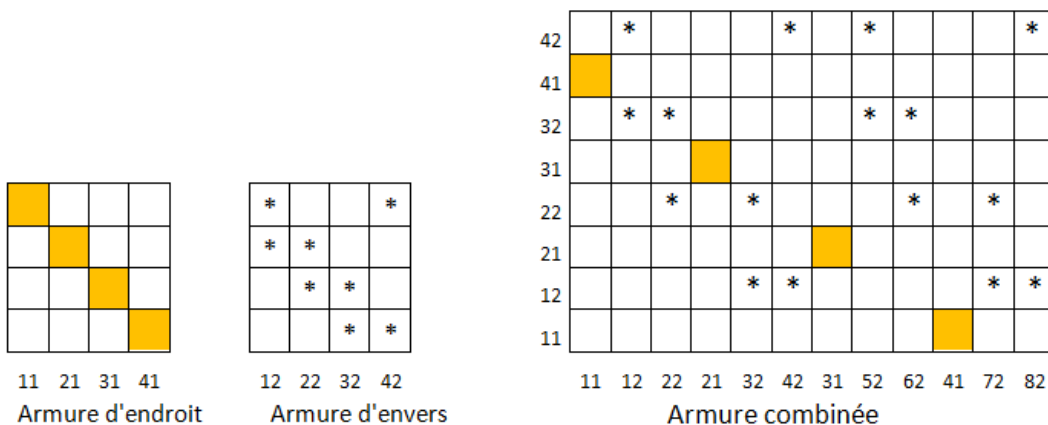


Figure 1.8 : Représentation imbriquée du tissu double étoffe, proportion en chaîne (1.E/2.e) et en trame (1.E/1.e)

Il faut noter ici qu’en cas de double étoffe liée à proportions inégales, il est préférable souvent d'utiliser des fils (chaîne ou trame) de gros titre pour le fil ayant la plus petite proportion, car les gros éléments occupent plus de place que des petits éléments et aussi masqueront ceux-ci.

Un simple exemple pour éclairer cette notion : en cas de double étoffe liée ; proportion en chaîne « 1.E/1.e », proportion en trame « 2.E/1.e », la trame d’envers sera plus grosse que la trame d’endroit.

#### 4.1.1.1 Principe de construction :

Pour exécuter le tissu d'endroit, la chaîne du tissu d'endroit lève et baisse suivant l'armure d'endroit pour insérer la duite de ce tissu, tandis que les fils du tissu d'envers ne bougent pas.

Au passage des duites du tissu d'envers, tous les fils du tissu d'endroit doivent être levés, en même temps que les fils d'envers qui se lèvent suivant l'armure d'envers. Cette levée complète des fils d'endroit est désignée par « levée masse » et est représentée par « x ». La figure 1.9 représente l'armure illustrée figure 1.8 précédente avec les levées masse.

Suivant ce travail, on obtient deux tissus complets séparés l'un de l'autre. Donc pour avoir le double tissu lié, il faut obligatoirement que l'un des éléments d'un tissu s'attache à l'autre. Cet assemblage se fait par plusieurs modes.

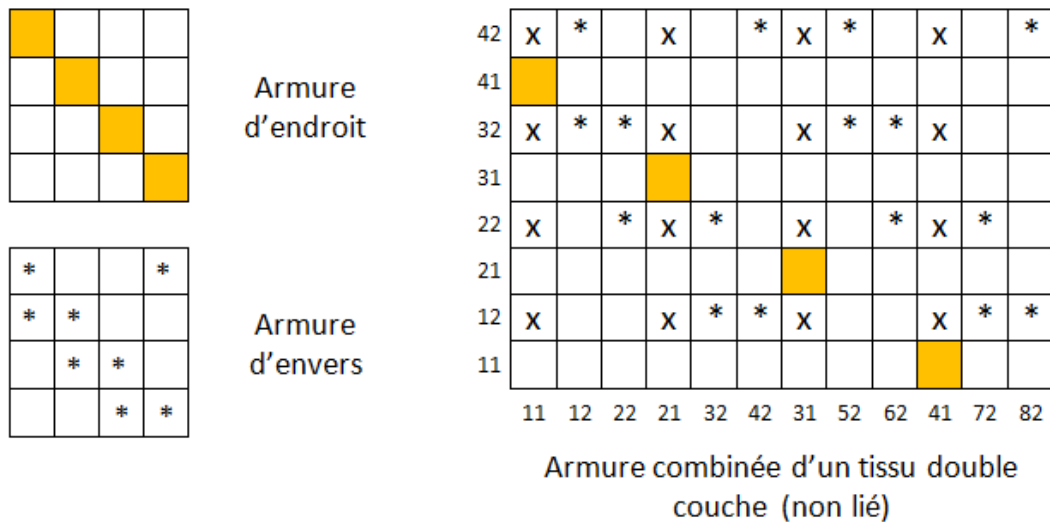


Figure 1.9 : Représentation imbriquée du tissu double étoffe non lié, proportion en chaîne (1.E/2.e) et en trame (1.E/1.e)



#### 4.1.1.2 Modes d'assemblage :

On peut distinguer trois modes d'assemblage [10], qui sont représentés à la figure 1.10 :

**1. Auto-liage :** L'assemblage entre les deux tissu est assuré par des points d'accrochage entre les fils constituant chaque tissu et distribués de façon aléatoire ou en tant qu'une armure classable.

Il existe trois procédés d'assemblage qui peuvent éventuellement être combinés :

**a) Liage par ascension :** Le tissu d'envers se lie avec le tissu d'endroit par un point d'ascension quand un fil du tissu d'envers est levé lors d'insertion de la trame du tissu d'endroit. L'ascension est représentée par une pointe de flèche dirigé vers le haut « **Λ** » dans la couleur du fil qui fait l'ascension (donc du fil d'envers)

Pour que l'ascension soit invisible, il faut que :

- Vu de l'endroit : cela correspond à un pris d'endroit
- Vu de l'envers : cela correspond à une laissé d'envers.

Donc par transparence, vu de l'endroit, il faut qu'il y ait concordance d'un pris d'endroit et d'un pris d'envers. Cela suppose donc une sympathie d'armure dans les zones d'assemblage.

**b) Liage par descension :** Quand un fil d'endroit descend pour venir se lier à la duite d'envers, un point de descension est produit pour lier le tissu d'endroit avec le tissu d'envers. La descension est représentée par une pointe de flèche dirigé vers le bas « **V** » dans la couleur du fil qui fait la descension (donc du fil d'endroit).

Pour que la descension soit invisible, il faut que :

- Vu de l'endroit : cela correspond à une laissé d'endroit
- Vu de l'envers : cela correspond à un pris d'envers.

Donc par transparence, vu de l'endroit, il faut qu'il y ait concordance d'une laissé d'endroit et d'une laissé d'envers. Cela suppose donc une sympathie d'armure dans les zones d'assemblage.

- c) **Double liage ou liage multiple «  $\Lambda V$  »:** Ce type d'assemblage est effectué par la combinaison de deux précédents procédés d'assemblage. C'est à dire le tissu d'endroit s'assemble au tissu d'envers par descension, tandis que le tissu d'envers s'assemble au tissu d'endroit par ascension.

Dans tous les cas (a, b, c), la sympathie d'armure n'est pas une obligation.

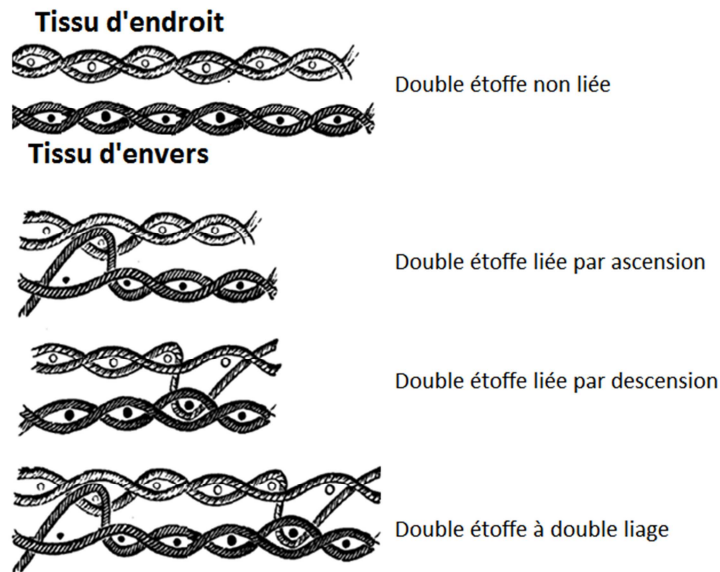


Figure 1.10 : Modes d'assemblage

La figure 1.11 montre les armures d'un tissu double étoffe à liage multiple. Les fils sont de proportion en chaîne (1.E/1.e) et en trame (1.E/1.e).

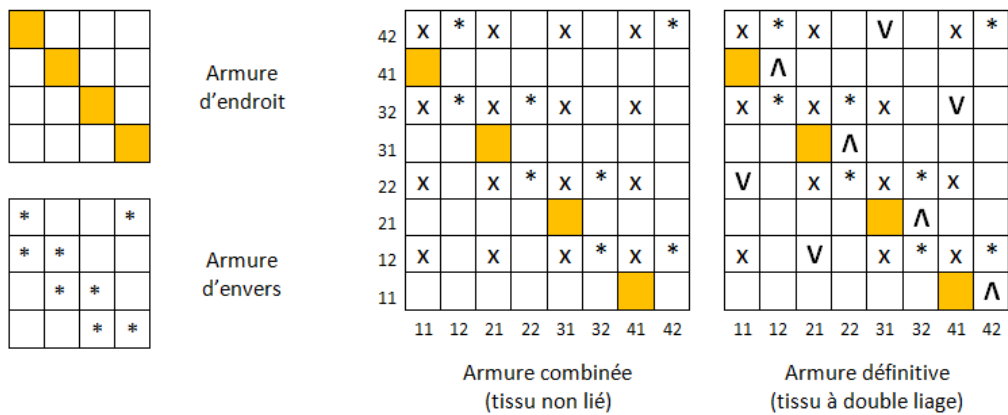


Figure 1.11 : Tissu double étoffe lié

**Liage par des fils spéciaux :** Dans certains tissus lourds comme certains tissus techniques, il est parfois impossible de trouver un assemblage convenable entre les armures d'endroit et d'envers. Dans ce cas, on ajoute un troisième fil (chaîne ou trame) pour assurer le liage. On utilise souvent l'accrochage par une chaîne supplémentaire, fine et résistante dont la proportion est souvent inférieure aux deux autres chaînes (figure 1.12).

La double étoffe dans ce cas comporte 3 chaînes et 2 trames et elle est plus épaisse qu'un tissu double couche auto-lié [3].

Dans ce mode d'assemblage, nous pouvons distinguer deux types de points de liage: le premier est appelé un point d'ascension - symbolisé par un symbole «  $\Lambda$  », et le second point est appelé un point de descension - représenté par le symbole «  $V$  ».

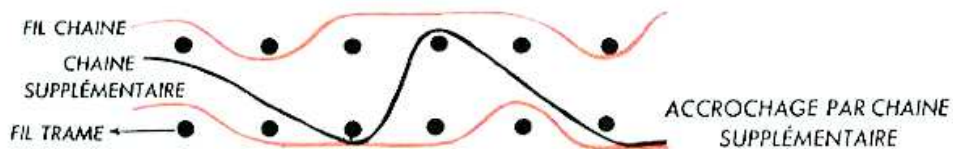


Figure 1.12 : Liage par chaîne supplémentaire

Lors de l'exécution de l'armure d'endroit, on distingue deux modes de travail d'un fil de liage :

- 1- Lorsque le fil de liage est levé, il s'accroche à la trame du tissu d'endroit et donc cela conduira à former le point d'ascension «  $\Lambda$  ».
- 2- lorsque le fil de liage n'est pas levé, il ne s'accroche pas à la trame d'endroit et donc ne produira pas un point de liage. Dans ce cas, le fil reste dans une position horizontale entre les tissus d'envers et d'endroit s'il ne produit pas dans la suite un point de liage avec le tissu d'envers.

Lors de l'exécution de l'armure d'envers, on distingue aussi deux modes de travail d'un fil de liage :

- 1- lorsque le fil de liage n'est pas levé, il s'accroche à la trame d'envers et donc conduira à former le point de descension «  $V$  ».

**2-** Lorsque le fil de liage est levé avec la levée complète des chaînes d'endroit, il ne s'accroche pas à la trame d'envers et donc ne produira pas un point de liage. Dans ce cas, le fil reste dans une position horizontale entre les tissus d'envers et d'endroit s'il ne produit pas dans la suite un point de liage avec le tissu d'endroit.

Donc, le fil de liage reste dans une position horizontale entre les tissus d'endroit et d'envers quand il n'est pas utilisé pour lier les deux tissus [14].

Comme mentionnée précédemment, la levée complète des fils d'endroit lors de l'exécution de l'armure d'envers sur le métier à tisser sera désigné par « **levée masse** ». Cette désignation, en cas de double étoffe liée par un fil supplémentaire, signifie que la levée complète des chaînes d'endroit et la levée complète de l'ensemble ou d'une partie des fils de liage lors du tissage de tissu d'envers.

Il y a un manque de sympathie aussi bien pour les ascensions que pour les descensions, mais la dissimulation des points de liage est assurée par la finesse de la chaîne de liage par rapport aux autres chaînes, par sa couleur qui sera toujours neutre.

La figure 1.13 montre un exemple d'une double étoffe liée par une chaîne de liage spéciale: proportion en chaîne « 1.E/1.e/1.FL, 1.E/1.e », proportion en trame « 1.E/1.e », armure d'endroit et d'envers en toile, rapport R=4. Le nombre des fils de liage dans le rapport est de 2 situés sur les fils 3 et 8, l'armure d'assemblage à chercher.

**2. Liage par combinaison des tissus :** Les deux tissus (tissu d'endroit et tissu d'envers) se combinent par diverses méthodes pour former le tissu double étoffe multiple, comme le cas du tissu poche ou tissu tubulaire, comme indiqué figure 1.6.

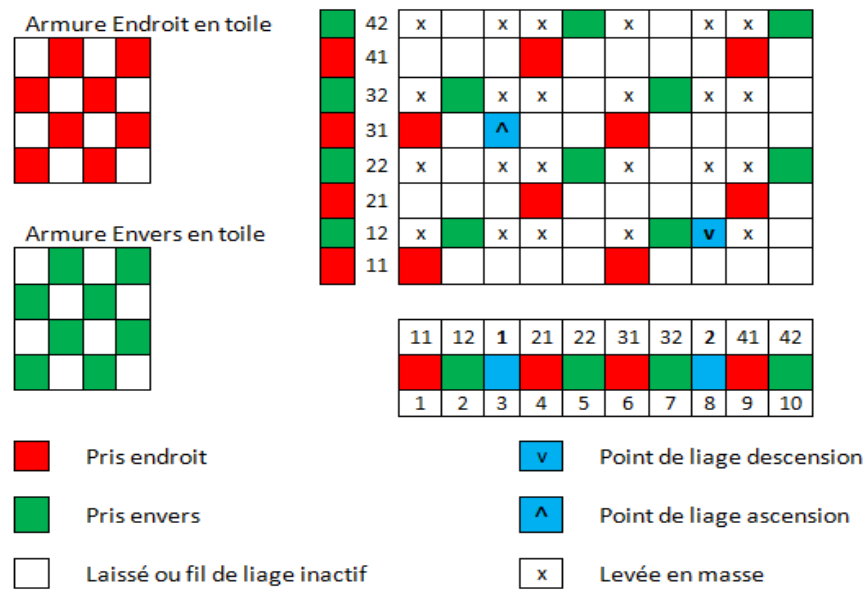


Figure 1.13 : Armure du tissu double étoffe lié par chaines supplémentaires

#### 4.1.1.3 Résumé des principes de construction :

Si l'apparence sur l'endroit de la double étoffe est primordiale par rapport à l'autre face, il est préférable que les armures d'assemblage soient sélectionnées en fonction des armures d'endroit et de leurs proportions, et que la sympathie soit au maximum pour le tissu d'endroit et au mieux pour le tissu d'envers car le tissu d'envers est juste destiné à donner l'épaisseur à la double étoffe. Pour cette raison, la méthode utilisée pour construire l'armure de double étoffe est la suivante:

On fixe l'armure d'endroit, puis on cherche les points de liage désirés qui sont en sympathie avec l'armure d'endroit en construisant l'armure de liage. Ensuite, on adapte une armure d'envers à condition d'assurer au mieux la sympathie avec l'armure d'endroit dont les pris coïncident avec les points d'ascension de l'armure d'assemblage car le liage se fera par la chaîne d'envers « ascension »,

Les pris coïncident avec les points d'ascension et les laissés avec les points de descension de l'armure d'assemblage en cas de double liage, ou les laissés avec les points de descension de l'armure d'assemblage en cas de liage par descension « chaîne d'envers ».

Si l'apparence de la double étoffe est de la même importance sur les deux faces, on utilise la méthode suivante lors de la construction de l'armure :

On fixe l'armure d'endroit et l'armure d'envers, puis on cherche l'armure de liage à condition d'assurer le maximum de sympathie entre l'endroit et l'envers. Comme le liage se fera par les chaînes d'endroit (descension) et les chaînes d'envers (ascension), les points de liage « ascension » doivent être recherchés selon la priorité de maximum de sympathie avec les pris d'endroit et d'envers, puis les points de liage (descension) doivent être au maximum de sympathie avec les laissés de deux armures.

Si l'apparence de la double étoffe n'est pas d'importance, (cas des plupart des tissus à usage technique) : la densité des points de liage sera la priorité (selon l'application du tissu), dans ce cas, on cherche le maximum de points de liage qui assure les meilleures propriétés mécaniques requises même si la sympathie est minimum dans le tissu.

#### 4.1.2 Tissu triple couches

Une étoffe triple liée est composée de trois tissus distincts superposés, ayant chacun leurs éléments propres (chaîne et trame) et qui sont assemblées les uns aux autres suivant plusieurs modes, de façon à faire une seule étoffe d'une forte épaisseur jointe à une grande solidité. Le principe de construction est le même que pour les doubles étoffes.

Ces trois tissus sont : le tissu d'endroit (symbolisé **E**), le tissu d'envers (symbolisé **e**), et le tissu intermédiaire (symbolisé **I**), qui pourraient être totalement différents (l'armure, la nature et la couleur des fils, le titre...etc.) ou identiques. Dans ce type de tissu triple, on aura seulement deux faces qui sont peut-être complètement différentes ou identiques.

Ce type du tissu triple couche est souvent destiné à des usages techniques.

La figure 1.14 montre une représentation imbriquée vue de l'endroit d'un tissu à trois couches non liées, proportion en chaîne « 1.E/1.i/1.e », proportion en trame « 1.E/1.i/1.e », armure endroit et envers en toile tandis que l'armure intermédiaire est en sergé 4 effet trame cordon à gauche. Toutes les armures ont un rapport  $R=4$ .

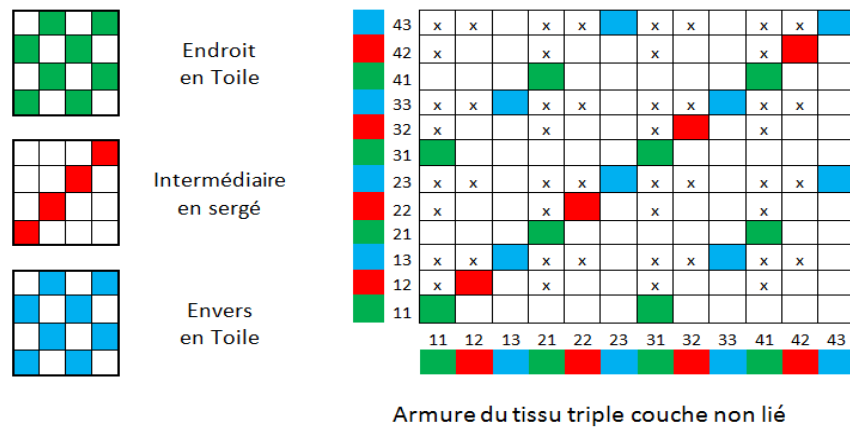


Figure 1.14 : Armure du tissu triple couches non liées

#### 4.1.2.1 Modes d'assemblage :

1. **Liage par Ascension «  $\Lambda$  »** : la chaîne d'un tissu lève sur la trame de celui immédiatement au-dessus.
2. **Liage par descension «  $\nabla$  »** : la chaîne d'un tissu baisse sous la trame de celui immédiatement dessous.
3. **Double liage par la couche intérieure «  $\Lambda\nabla$  »** : le tissu intermédiaire s'assemble aux tissus d'endroit et d'envers, par ascension en levant les chaînes intermédiaires sur la trame d'endroit, et par descension en baissant les chaînes intermédiaires sous la trame de l'envers.
4. **Double liage par les couches extérieures «  $\nabla\Lambda$  »** : le tissu d'endroit s'assemble au tissu intermédiaire par descension tandis que le tissu d'envers se lie au tissu intermédiaire par ascension.

La figure 1.15 nous montre, en coupe par la trame, l'aspect du tissu triple, lié par les différents modes mentionnés précédemment.

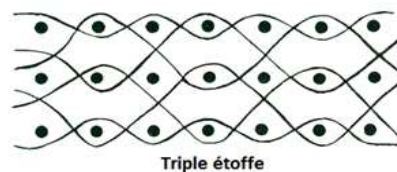


Figure 1.15 : Tissu triple étoffe liée par différents modes de liage

# **CHAPITRE 2**

## **CONCEPTION DE TEXTILE ASSISTEE PAR ORDINATEUR**





## 1. Introduction à la Conception Assisté par l'Ordinateur (CAO):

La **Conception Assistée par Ordinateur (CAO)** par définition, est l'utilisation des outils informatiques (logiciels et techniques) qui aident les ingénieurs textiles, mécaniques, architectes et autres professionnels dans leurs activités de conception. L'ensemble de ces outils permettent de concevoir, de tester virtuellement - à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique - et de réaliser la modélisation géométrique et la fabrication dans le processus de la production et du management, et implique à la fois du logiciel et parfois des matériels à usages spéciaux.

Les systèmes de CAO ont été élaborés avec le développement des langages informatiques (Fortran, MATLAB, C, Visual Basic, etc.) et ils sont devenus la base de tout au long du processus d'ingénierie de conception mécanique, textile, électroniques et électriques, aéronautique, construction navale,...etc.

Dans cette recherche :

L'abréviation « **CAAO** » désigne : la **Conception d'Armure Assistée par Ordinateur**.

L'abréviation « **CTAO** » désigne : la **Conception de Textile Assistée par Ordinateur**.

L'abréviation « **FTAO** » désigne : la **Fabrication de Textile Assistée par Ordinateur**.

L'abréviation « **CFTAO** » désigne: la **Conception et la Fabrication de Textile Assistées par Ordinateur**.

## 2. Le CAO/FAO dans l'industrie textile :

Eu égard au développement des machines textiles, qu'il est maintenant possible de commander électroniquement et compte tenu de l'évolution informatique, il est devenu nécessaire de développer des moyens pour faire face à ces machines textiles modernes, et de trouver des moyens mathématiques et des logiciels afin de conduire à l'amélioration de la productivité de ces machines.

L'ordinateur est l'un des outils des plus importants dans l'industrie du textile, car grâce à lui, la production industrielle de produits textiles est aujourd'hui entièrement gérée et pilotée.

Le développement des technologies de la conception et fabrication de textile assistée par ordinateur CAO/FAO ou CFAO a fait l'objet de l'attention de nombreux chercheurs [15]–[23].

Le processus du tissage fait partie de l'industrie textile, où les étoffes et les structures textiles tissées sont réalisées et gérées à l'aide des logiciels industriels conçus spécifiquement pour ce but. Grâce à la programmation numérique, ces logiciels permettent à chaque étape, la gestion et la création textile dès la conception des motifs, la création d'un tissu armuré à partir d'une fiche technique, le dessin du rentrage, la formule d'ourdissage et de tramage et l'écriture du carton, la création des variantes colorées, la coloration et la modification de dessins, l'impression du dessin coloré directement sur des échantillons de tissus, la fiche technique du tissu, le stockage des données, la mise en carte du tissu jacquard, la simulation du tissu en 3D, le pilotage des métiers à tisser,..., etc. Ces logiciels suivent l'évolution technique par des mises à jour régulières et sont basés sur les différents systèmes d'exploitation (*Windows, Mac ou Linux*) [24].

Aujourd'hui dans les métiers à tisser, les systèmes de commande électroniques sont assurés par des ordinateurs qui permettent l'envoi de données en codage binaire pour commander les positions des cadres sur les métiers à tisser armurés, ou des crochets sur les métiers jacquard. Ces systèmes de CAO assurent la gestion et la création textile et spécifient tous les paramètres de tissage depuis la conception des armures jusqu'à la production des matières textiles sur différents type de métiers à tisser.

Des exemples de ces logiciels sont : Pointcarré [25] , Ned-Graphics[26], ArahWeave [27], ScotWeave [28], ..., etc. Ces logiciels permettent de concevoir et de modifier à volonté tous types de tissus armurés ou de tissus Jacquard, depuis l'idée jusqu'à la fabrication sur le métier. Les figures 2.1, 2.2 et 2.3 montrent un exemple de ces logiciels.

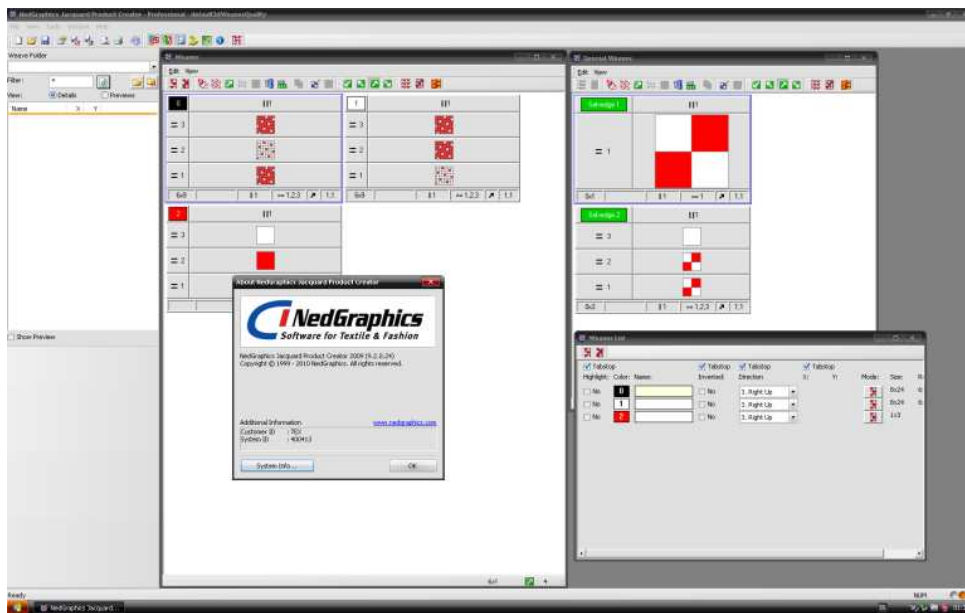


Figure 2. 1 : Interface du logiciel Ned-Graphics [26]

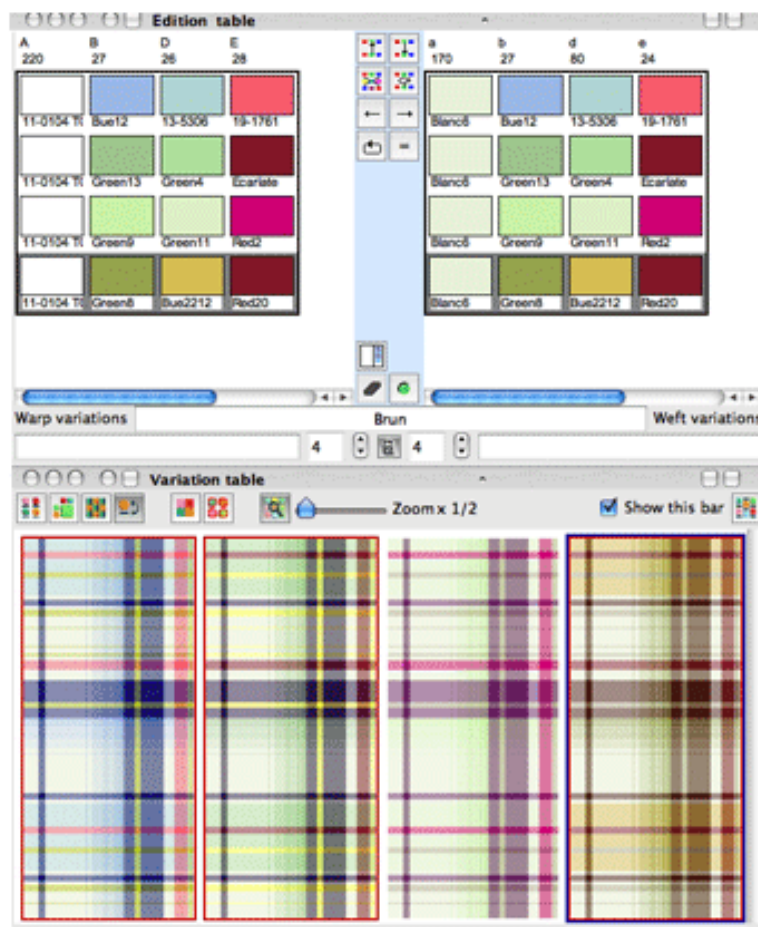


Figure 2. 2: Interface d'une conception d'un tissu par le logiciel Pointcarré [25]

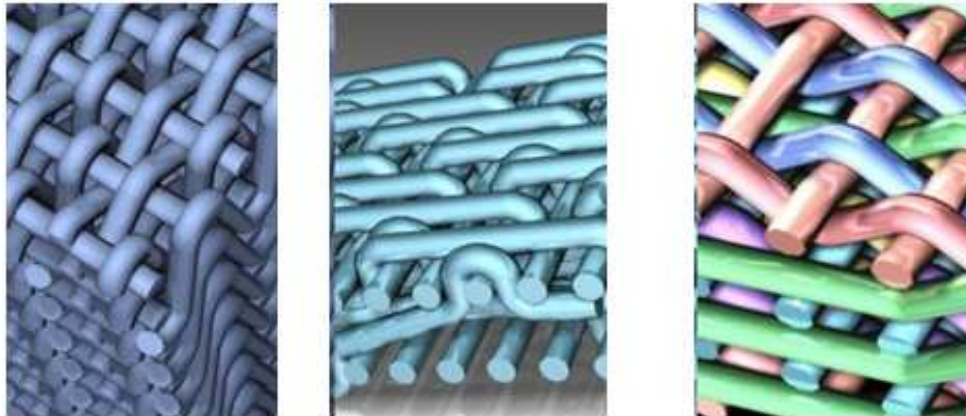


Figure 2. 3 : Schéma en 3D d'une structure technique par le logiciel : ScotWeave [28]

### 3. Textiles à usage techniques :

Les textiles à usage techniques **TUT** représentent le secteur le plus dynamique de l'industrie textile, l'utilisation de tissus pour des applications techniques, autres que l'habillement et l'ameublement, n'est pas nouvelle. L'évolution de l'industrie textile, en particulier le tissage en 3D, dans les renforts de matériaux composites prend importance. Le développement de toutes ces techniques et ces équipements est des plus en plus nécessaire pour diminuer les temps de production en particulier avec l'utilisation des métiers à tisser modernes rapides qui sont équipés de commandes électroniques. Pour cela, la conception des armures assistée par ordinateur **CAAO** est considérée comme un des moyens pour faciliter le travail et pour augmenter la productivité, en particulier dans le tissage des structures complexes en raison des difficultés impliquées dans la conception manuelle qui comprend la combinaison des armures, la recherche des points de liage entre les couches formant la structure complexe, le rentrage des fils dans les lames , le piquage au peigne , la disposition des chaînes, les coupes en chaîne et en trame, ... etc [8][29].

### 4. Conception des armures assistée par ordinateur CAAO :

Outre la représentation graphique précédemment décrite, une représentation mathématique de l'armure sous la forme d'une matrice binaire  $W$  de 0 et 1 peut être utilisée [30], [31]. Dans cette méthode chaque élément est exprimé par  $w(x, y)$  qui fournit

l'entrecroisement entre une chaîne et une de trame au croisement  $(x, y)$ , où  $w(x, y) = 0$  si une trame passe sur une chaîne et  $w(x, y) = 1$  si une chaîne est sur une trame comme représenté dans la figure 2.4.

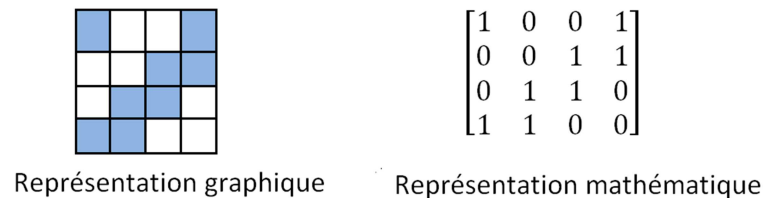


Figure 2. 4: Représentation graphique et mathématique d'une armure

Cette représentation mathématique reste la base sur laquelle de nombreux logiciels de **CFTAO** ont été élaborés pour générer, modéliser et analyser des tissus.

En raison de la grande variété des armures et la difficulté de traiter les dessins textiles, les chercheurs ont recherché des méthodes mathématiques programmables et des logiciels pour remplacer les méthodes traditionnelles de traitement des différentes conceptions de tissus.

Lourie [31] qui a travaillé sur les tissus multicouches est un des premiers qui ont utilisé une méthode numérique de ces tissus. Fujita, Go et al, Vincent, Freeman et Peters ont présenté plusieurs suggestions pour l'amélioration de la méthode de représentation des structures tissés [32].

Newton et Sarkar [32] ont utilisé une représentation numérique en utilisant une matrice binaire de 0 et 1 pour analyser et classer des armures des tissus multicouches et ont proposé un procédé de détermination de la topologie d'un tissu.

Milasiuset et Reklaitis [33] en 1988 ont proposé une méthode pour classer des armures en fonction du niveau de leurs complexité (toile , sergé , satin , ..,etc. ) fondée sur le principe de décodage des armures et au moyen d'un logiciel développé appelé **DESINT** (DESIGN INTERpreter).

Cependant, Il ya un nombre important de recherches qui abordent la CAAO sous forme de matrices 2D (matrice d'armure). Un grand nombre de logiciels de CTAO pour des

structures tissées complexes ont été développés. Certaines de ces recherches dépendent de fonctions mathématiques pour décrire et générer automatiquement les armures 2D et 3D [34]–[36]. Dans d'autres publications, l'algorithme du produit de Kronecker a été appliqué pour décrire l'armure [14], [37], [38].

En outre, la nécessité d'améliorer et d'accélérer la productivité a contribué au développement d'autres applications de CTAO qui traitent de la modélisation géométrique des structures tissées en raison de la nécessité de visualiser l'apparence des tissus [15], [39]–[41].

En revanche, en particulier dans les structures complexes, les travaux présentés de la CAAO ne couvrent pas tout le domaine, en raison de la grande variété de méthodes de tissages et de liages.

Dans ce chapitre, trois nouvelles approches de CAAO liées aux tissus complexes sont abordées, spécifiquement la CAAO pour un tissu double et triple couches. L'une de ces approches est de trouver un module mathématique programmable traitant un tissu double couche lié par une chaîne de liage spéciale.

La deuxième approche est de trouver automatiquement suivant le mode du liage, le maximum des points de liage disponibles pour un tissu triple couche auto-lié.

La troisième approche est de générer automatiquement, par un module mathématique programmable, toutes les armures de liage disponibles pour un tissu donné (tissu double ou triple), ce module est applicable pour la plupart de modes de liage mentionnés précédemment.

De simples modifications mathématiques peuvent être apportées au troisième module mathématique pour qu'il devienne applicable dans le cas d'un tissu à double face.

### **5. CAAO pour un tissu double couches :**

Comme il a été mentionné précédemment dans le premier chapitre, l'assemblage des couches d'une double étoffe se fait par différents modes. L'auto-assemblage et le double

assemblage des couches ont été mathématiquement étudiés par Chen et al [36] en s'appuyant sur un ensemble de matrices binaires et d'équations mathématiques. Un logiciel de démonstration écrit en Visual Basic avait été développé.

Gu Ping et al [14] ont proposé une autre méthode pour développer un algorithme mathématique programmable qui traite les différents modes d'assemblage utilisés pour lier les deux couches d'une double étoffe: l'auto-assemblage, le double assemblage, le liage par combinaison des deux couches, et l'assemblage par des fils spéciaux (chaîne ou trame),...etc. Cette approche est basée sur la description des armures par matrices binaires, et sur l'application du produit tensoriel appelé « **produit de Kronecker**» qui est aussi une opération portant sur les matrices.

Par ailleurs, en utilisant des matrices binaires, basée sur quelques fonctions mathématiques présentés par Chen et Potiyaraj [36][35], et par Chen et al [34], ce document décrit un nouveau module mathématique programmable pour générer automatiquement un tissu double couche liée par chaîne spéciale (fil de liage).

### 5.1. CAAO pour un tissu double couche lié par chaînes spéciales :

La figure 2.5 représente une double étoffe liée par une chaîne de liage, elle est définie comme suit :

- Type du tissu : Double étoffe liée.
- Définition du tissu d'endroit «E». :
  - Armure : Sergé sans envers ou sergé croisé.
  - Rapport d'armure : 4 en chaîne et 4 en trame.
  - Proportions en chaîne : 2, Proportions en trame : 1
- Définition du tissu d'envers «e».
  - Armure : Sergé sans envers ou sergé croisé.
  - Rapport d'armure : 4 en chaîne et 4 en trame.
  - Proportions en chaîne : 1, Proportions en trame : 1
- Type d'assemblage :
  - Liage par chaîne de liage «FL».



Nombre de fils de liage dans le rapport : 2

Proportion de chaîne de liage : 1

- o Proportion des chaînes dans le tissu :

2E : 1e : 2E : 1FL : 1e : 2E : 1e : 2E : 1FL : 1e : 2E : 1e

- o Méthode de Rentrage : rentrage suivi.
- o Armure de liage: un point dans chaque fil de liage (ascension + descension)

Toutes les armures sont vues de l'endroit.

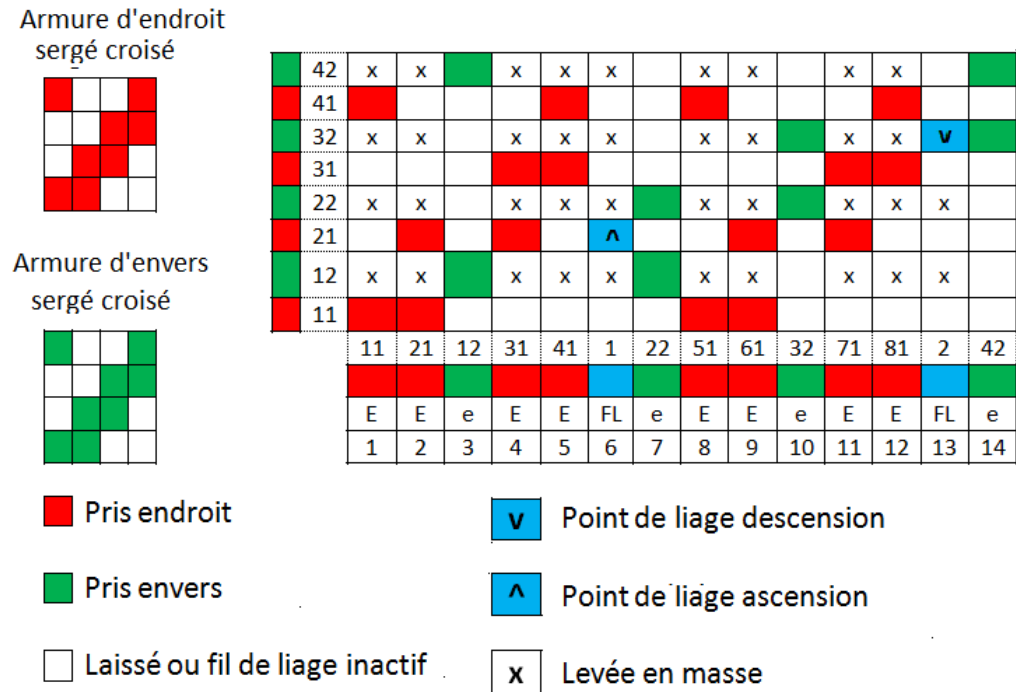


Figure 2. 5: Double étoffe liée par une chaîne de liage

### 5.1.1 Identification mathématique des armures :

Comme mentionné précédemment, en prenant le double tissu illustré dans la figure 2.5, la première étape consiste à définir les armures des tissus d'endroit et d'envers comme suit:

Le tissu d'endroit est défini par le chiffre «1», tandis que le tissu d'envers est défini par le chiffre «2». Le fil de liage est symbolisé par la lettre «c».

$P_{ch1}, P_{tr1}$  : Proportion de chaîne et Proportion de trame pour le tissu d'endroit.

$$P_{ch1} = 2 \quad , P_{tr1} = 1$$

$r_{ch1}, r_{tr1}$  : Rapport de chaîne et Rapport de trame pour le tissu d'endroit.

$$r_{ch1} = 4 \quad , r_{tr1} = 4$$

$P_{ch2}, P_{tr2}$  : Proportion de chaîne et Proportion de trame pour le tissu d'envers.

$$P_{ch2} = 1 \quad , P_{tr2} = 1$$

$r_{ch2}, r_{tr2}$  : Rapport de chaîne et Rapport de trame pour le tissu d'envers.

$$r_{ch2} = 4 \quad , r_{tr2} = 4$$

$P_c$  : Proportion de chaîne de liage,  $P_c = 1$

$R_c$  : Nombre de fils de liage dans le rapport d'armure de double étoffe,  $R_c = 2$

### 5.1.2 Génération mathématique des armures:

Comme mentionné précédemment, la représentation mathématique d'armure est faite par une matrice binaire dont les éléments sont 0 et 1. La figure 2.6, illustre les armures d'endroit et d'envers avec les représentations mathématiques associées.

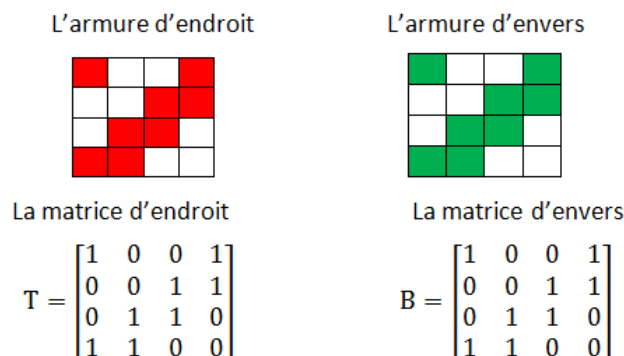


Figure 2. 6: Représentation mathématique des armures

Une extension d'armure doit être effectuée selon la proportion de la chaîne et de la trame de chaque tissu. L'extension d'armure d'endroit « **T** » donne l'armure étendue d'endroit, et mathématiquement la matrice étendue de l'endroit « **ET** », tandis que l'armure

étendue d'envers et la matrice étendue d'envers « **EB** » sont obtenues par l'extension d'armure d'envers « **B** ».

Cette extension se fait comme suit :

Premièrement, fondées sur les recherches de Chen et Potiyaraj [36][35] , le nombre de répétition d'armure dans les deux sens (sens chaîne et sens trame) doit être calculé par les formules suivantes:

$$M_{chn} = \frac{M_{ch} \cdot P_{chn}}{r_{chn}} \quad (2.1)$$

$$M_{trn} = \frac{M_{tr} \cdot P_{trn}}{r_{trn}} \quad (2.2)$$

Où :

**n** : Nombre de couche, n=1 pour le tissu d'endroit, n=2 pour le tissu d'envers.

**M<sub>chn</sub>** , **M<sub>trn</sub>** : Nombre de répétition en sens chaîne et en sens trame respectivement pour l'armure d'endroit (si n=1), et pour l'armure d'envers (si n=2).

**M<sub>ch</sub>** : est le plus petit nombre qui rend cette équation égale à zéro :

$$(M_{ch} \cdot P_{ch1}) \text{ Mod } r_{ch1} = (M_{ch} \cdot P_{ch2}) \text{ Mod } r_{ch2} = 0 \quad (2.3)$$

**M<sub>tr</sub>** : est le plus petit nombre qui rend cette équation égale à zéro :

$$(M_{tr} \cdot P_{tr1}) \text{ Mod } r_{tr1} = (M_{tr} \cdot P_{tr2}) \text{ Mod } r_{tr2} = 0 \quad (2.4)$$

**Mod** : est l'abréviation de modulo, opérateur qui donne le reste de la division entre deux nombres.

Deuxièmement, les rapports des armures étendues du tissu endroit et du tissu d'envers doivent être calculés à partir des formules suivantes :

$$R_{chn} = M_{chn} \cdot r_{chn} \quad (2.5)$$

$$R_{trn} = M_{trn} \cdot r_{trn} \quad (2.6)$$

Où :

$R_{chn}$ : est le rapport d'armure étendue au sens chaîne pour le tissu d'endroit si  $n=1$ , où pour le tissu d'envers si  $n=2$ .

$R_{trn}$ : est le rapport d'armure étendue au sens trame pour le tissu d'endroit si  $n=1$ , où pour le tissu d'envers si  $n=2$ . C'est-à-dire :

$$\text{Si : } n = 1 \Rightarrow \left( \begin{array}{l} R_{ch1} : \text{ est le rapport d'armure étendue d'endroit au sens chaîne} \\ R_{tr1} : \text{ est le rapport d'armure étendue d'endroit au sens trame} \end{array} \right)$$

$$\text{Si : } n = 2 \Rightarrow \left( \begin{array}{l} R_{ch2} : \text{ est le rapport d'armure étendue d'envers au sens chaîne} \\ R_{tr2} : \text{ est le rapport d'armure étendue d'envers au sens trame} \end{array} \right)$$

Après avoir trouvé tous les paramètres identifiants les armures étendues de chaque tissu, la construction des matrices représentant ces armures doit être effectuée. Les dimensions des matrices étendues sont égales aux rapports des armures étendues.

La matrice d'endroit **T** dont les éléments sont  $t_{(i,j)}$  doit être étendue à la matrice **ET** dont les éléments sont  $t_{(x,y)}^e$ , ainsi que la matrice d'envers **B** dont les éléments sont  $b_{(i,j)}$  doit être étendue à la matrice **EB** dont les éléments sont  $b_{(x,y)}^e$ , comme suivant:

$$t_{(i,j)} \rightarrow ET \Leftrightarrow t_{(x,y)}^e = t_{(i,j)} \quad \left. \begin{array}{l} \text{pour } i = 1 \text{ à } r_{tr1} \\ \text{pour } j = 1 \text{ à } r_{ch1} \end{array} \right\} \quad (2.7)$$

$$b_{(i,j)} \rightarrow EB \Leftrightarrow b_{(x,y)}^e = b_{(i,j)} \quad \left. \begin{array}{l} \text{pour } i = 1 \text{ à } r_{tr2} \\ \text{pour } j = 1 \text{ à } r_{ch2} \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

Tous les couples binaires (x, y) d'une matrice étendue résultants des couples binaires (i, j) de la matrice correspondante sont calculés par les formules suivantes:

$$x = i + R_{trn} - h \cdot r_{trn} \quad \text{pour } h = 1, 2, \dots, M_{trn} \quad (2.9)$$

$$y = j + R_{chn} - a \cdot r_{chn} \quad \text{pour } a = 1, 2, \dots, M_{chn} \quad (2.10)$$

Pour notre exemple illustré figure 2.5, la génération des matrices étendues se fait en appliquant les équations (2.1) à (2.10) et en référant aux paramètres des tissus, comme suit :

Premièrement, on trouve les  $M_{ch}$  et  $M_{tr}$  en appliquant la formula (1.3) et (1.4) :

$$\left. \begin{aligned} (M_{ch} \cdot 2) \text{ Mod } 4 = (M_{ch} \cdot 1) \text{ Mod } 4 = 0 &\Leftrightarrow M_{ch} = 4 \\ (M_{tr} \cdot 1) \text{ Mod } 4 = (M_{tr} \cdot 1) \text{ Mod } 4 = 0 &\Leftrightarrow M_{tr} = 4 \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Puis, on calcule les paramètres  $M_{ch1}, M_{ch2}, M_{tr1}, M_{tr2}$  en utilisant les équations (2.1) et (2.2) :

$$\left. \begin{aligned} \text{pour le tissu d'endroit, } n = 1 &\Leftrightarrow M_{ch1} = \frac{M_{ch} \cdot P_{ch1}}{r_{ch1}} \Leftrightarrow M_{ch1} = 2 \\ &M_{tr1} = \frac{M_{tr} \cdot P_{tr1}}{r_{tr1}} \Leftrightarrow M_{tr1} = 1 \\ \text{Pour le tissu d'envers, } n = 2 &\Leftrightarrow M_{ch2} = \frac{M_{ch} \cdot P_{ch2}}{r_{ch2}} \Leftrightarrow M_{ch2} = 1 \\ &M_{tr2} = \frac{M_{tr} \cdot P_{tr2}}{r_{tr2}} \Leftrightarrow M_{tr2} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Deuxièmement, on calcule les rapports en chaîne et en trame des armures étendues  $R_{ch1}, R_{ch2}, R_{tr1}, R_{tr2}$  en appliquant les équations (2.5) et (2.6) :

$$\left. \begin{aligned} \text{pour le tissu d'endroit, } n = 1 &\Leftrightarrow R_{ch1} = M_{ch1} \cdot r_{ch1} \Leftrightarrow R_{ch1} = 8 \\ &R_{tr1} = M_{tr1} \cdot r_{tr1} \Leftrightarrow R_{tr1} = 4 \\ \text{Pour le tissu d'envers, } n = 2 &\Leftrightarrow R_{ch2} = M_{ch2} \cdot r_{ch2} \Leftrightarrow R_{ch2} = 4 \\ &R_{tr2} = M_{tr2} \cdot r_{tr2} \Leftrightarrow R_{tr2} = 4 \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Troisièmement, l'insertion des éléments  $t_{(i,j)}$  dans la matrice ET ainsi que les éléments  $b_{(i,j)}$  dans la matrice EB sont effectués suivant les équations (2.9) et (2.10). Prenant l'élément  $t_{(2,3)}$  comme exemple, cet élément correspondant à  $(i = 2, j = 3)$  devrait être

inséré dans la matrice étendue ET en trouvant le couple binaire  $(x, y)$  correspondant de la matrice ET :

$$\left. \begin{aligned} \text{De l'équation (1.9): } \quad x = i + R_{tr1} - h \cdot r_{tr1} &\Rightarrow x = 2 + 4 - (h) \cdot (4) = 6 - 4 \cdot (h) \\ \text{pour } h = 1 \quad \text{où } M_{tr1} = 1 &\Rightarrow x = 2 \end{aligned} \right\} (:$$

$$\left. \begin{aligned} \text{De l'équation (1.10): } \quad y = j + R_{ch1} - a \cdot r_{ch1} &\Rightarrow y = 3 + 8 - (a) \cdot (4) = 11 - 4 \cdot (a) \\ \text{pour } a = 1 \text{ à } 2 \quad \text{où } M_{ch1} = 2 & \\ \text{pour } a = 1 &\Rightarrow y = 7 \\ \text{pour } a = 2 &\Rightarrow y = 3 \end{aligned} \right\} (:$$

Donc, du couple binaires  $(i = 2, j = 3)$  appartenant à la matrice T, on obtient deux binaires  $(x = 2, y = 7)$  et  $(x = 2, y = 3)$  qui représentent deux éléments  $t_{(2,7)}^e$  et  $t_{(2,3)}^e$  appartenant à la matrice étendue ET. Par conséquent, l'élément  $t_{(2,3)} = 1$  sera inséré dans deux places de la matrice ET, donc les éléments  $t_{(2,7)}^e$  et  $t_{(2,3)}^e$  prennent la même valeur que  $t_{(2,3)}$ , soit :

$t_{(2,7)}^e = t_{(2,3)}^e = t_{(2,3)} = 1$ . En appliquant le même procédé sur tous les éléments  $t_{(i,j)}$  et  $b_{(i,j)}$ , on peut remplir tous les éléments des matrices étendu (ET et EB).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \mathbf{ET} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \mathbf{EB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Enfin, on calcule le rapport de l'armure double étoffe (ou les dimensions de la matrice double étoffe  $W_{(x,y)}$ ) à partir des formules suivantes :

$$\left. \begin{aligned} R_{ch} &= R_{ch1} + R_{ch2} + R_c \\ R_{tr} &= R_{tr1} + R_{tr2} \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

### 5.1.3 Matrice d'ordre de proportions des chaînes :

Lors du tissage d'une double étoffe liée par chaîne de liage, toutes les chaînes (chaîne d'endroit, chaîne d'envers, et chaîne de liage) doivent être mise en place préalablement suivant un ordre défini par l'armure. Cet ordre implique de rentrer les chaînes lors de l'opération du rentrage des fils sur la machine à tisser suivant leurs proportions.

Pour notre exemple illustré figure 2.5, les chaînes sont rentrées selon l'ordre suivant :

2 chaînes d'endroit / 1 chaîne d'envers/2 chaînes d'endroit / 1 fils de liage / 1 chaîne d'envers/2 chaînes d'endroit / 1 chaîne d'envers/2 chaînes d'endroit / 1 fils de liage / 1 chaîne d'envers.

Donc, l'ordre du rentrage peut-être écrit comme suit :

2. E/1.e/ 2. E /1.FL/1.e /2.E/1.e /2.E/1.FL/1.e

On peut représenter cette séquence dans un tableau en mettant un signe si le fil est présent suivant son ordre en négligeant la proportion de chaîne correspondante, (Tableau 1.1) :

Tableau 1. 1 : Ordre de rentrage des chaînes en séquence «E : FL : e»

Chaîne d'Endroit	E	X	X	X	X
Chaîne de liage	FL		X		X
Chaîne d'envers	e	X	X	X	X

On remarque en se référant à la séquence des trois chaînes (chaîne d'endroit, chaîne d'envers et fil de liage) que le fil de liage se trouve toujours après la chaîne d'endroit et avant la chaîne d'envers, soit dans l'ordre suivant : « **E. FL. e** ».

La représentation mathématique de l'ordre se fait par transfert du tableau à une matrice binaire de 0 et 1, correspondant exactement au tableau. Cette matrice est appelé matrice

d'ordre des chaînes et est symbolisé par « **D** » dont les dimensions sont trois lignes et  $M_{ch}$  colonnes, où  $M_{ch}$  est calculé selon l'équation (1.3).

Si le carré dans le tableau est plein, l'élément  $d_{(c,m)}$  correspondant de la matrice est égal à 1, soit :  $d_{(c,m)} = 1$ , tandis que la valeur 0 est donnée pour l'élément  $d_{(c,m)}$  si le carré est vide.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

En revanche, cet arrangement n'est pas le seul, mais un autre arrangement est possible pour lier les deux tissus par une chaîne de liage, celui est « **e. FL. E** », comme montré dans la figure 2.7, où les chaînes sont rentrées selon l'ordre suivant :

2 chaînes d'endroit / 1 chaîne d'envers/2 chaînes d'endroit / 1 chaîne d'envers/1 fils de liage / 2 chaînes d'endroit / 1 chaîne d'envers/2 chaînes d'endroit / 1 chaîne d'envers/1 fils de liage.

Donc, l'ordre du rentrage peut-être écrit comme suit :

2. E /1.e /2.E/1.e/1.FL /2. E /1.e /2.E/1.e/1.FL

On remarque aussi en se fondant sur la séquence des chaînes (endroit, envers et liage) que le fil de liage se trouve toujours après la chaîne d'endroit et la chaîne d'envers, soit dans l'ordre suivant : « **E. e. FL** ».

De la même manière, on peut représenter cette séquence dans un tableau, (tableau 1.2).

Tableau 1. 2: Ordre de rentrage des chaînes en séquence «E : e: FL»

Chaîne d'Endroit	E	X	X	X	X
Chaîne d'envers	e	X	X	X	X
Chaîne de liage	FL		X		X

La matrice binaire correspondant à cet ordre est la suivante :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Maintenant, après avoir généré toutes les matrices des tissus (ET, EB) ainsi que la matrice d'ordre des chaînes (D), la prochaine étape est de générer la matrice de double étoffe W par l'insertion de tous les éléments des matrices (ET, EB, D) dans la matrice W.

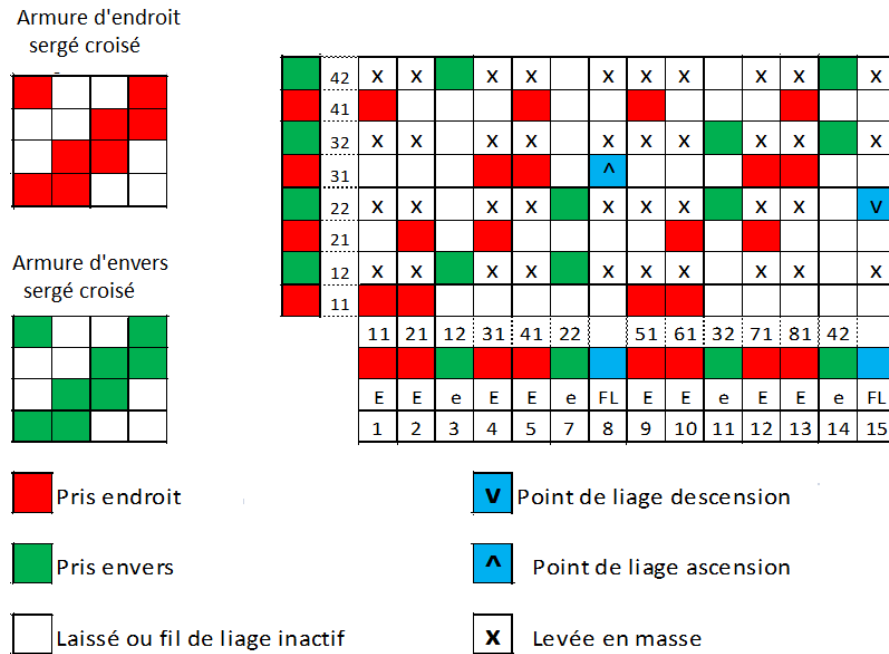


Figure 2. 7: Double étoffe liée par une chaîne de liage dans l'ordre « E. e. FL »

### 5.1.4 Insertion des fils dans la matrice de double étoffe :

Chaque éléments des matrices « ET » et « EB » doivent être insérés dans la matrice de double étoffe W comme suit :

$$\left. \begin{aligned} ET &\rightarrow W \Leftrightarrow t_{(i,j)}^e = w_{(x,y)} \\ EB &\rightarrow W \Leftrightarrow b_{(i,j)}^e = w_{(x,y)} \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

L'identificateur « x » se calcule au moyen de l'équation suivante :

$$x = i + (P_{tr1} + P_{tr2} - P_{trn}) \cdot [[(i - 1) \setminus P_{trn}] + (n - 1)] \quad \text{pour } i = 1 \text{ to } R_{trn} \quad (2.20)$$

Tandis que l'identificateur « y » se calcule à partir de l'équation suivante :

$$y = j + (P_{ch1} + P_{ch2} - P_{chn}) \cdot [(j - 1) \setminus P_{chn}] + (n - 1) + \sum_{m=1}^k (d_{(c,m)} \cdot P_c) \quad (2.21)$$

Où le paramètre « k » se calcule comme suit :

$$k = [(j - 1) \setminus P_{chn}] + [n \setminus c] \quad \text{pour : } \left\{ \begin{array}{l} i = 1 \text{ to } R_{chn} \\ 0 \leq k \leq M_{ch} \end{array} \right\} \quad (2.22)$$

Dans toutes les équations, on aura :

n=1, pour le tissu d'endroit et n=2, pour le tissu d'envers

c=3, si les chaînes se rangent dans l'ordre « **E. e. FL** »

c=2, si les chaînes se rangent dans l'ordre « **E. FL. e** »

Les chaînes de liage ( $j = 1, 2, \dots, R_c$ ) doivent être positionnées dans la matrice W. Pour ce faire, nous avons besoin de trouver le plus petit nombre « s » qui vérifie l'inégalité suivante :

$$\sum_{k=1}^s (d_{(c,k)} \cdot P_c) \geq j \quad \text{pour: } 1 \leq s \leq M_{ch} \quad (2.23)$$

Ensuite, l'équation (2.24) est appliquée pour déterminer la position des fils de liage « y » dans la matrice W :

$$y = j + [s \cdot P_{ch1}] + [s - (3 \text{ Mod } c)] \cdot P_{ch2} \quad (2.24)$$

Prenant la double étoffe illustrée dans la figure 2.5 comme un exemple pratique pour ces équations, on doit déterminer les nouveaux paramètres. Après avoir défini la notion de la matrice d'ordre des chaînes, on trouve que les chaînes de la double étoffe montrée dans la figure 2.5 sont rangées dans l'ordre « **E. FL. e** », et donc le paramètre « c » est égal à « 2 ».

La matrice d'ordre des chaînes est la suivante :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Les dimensions de la matrice « w » sont définies par le rapport en chaîne et le rapport en trame du tissu double, et seront calculées au moyen de l'équation (2.18) :

$$\left. \begin{aligned} R_{ch} &= R_{ch1} + R_{ch2} + R_c = 8 + 4 + 2 && \Leftrightarrow R_{ch} = 14 \\ R_{tr} &= R_{tr1} + R_{tr2} = 4 + 4 && \Leftrightarrow R_{tr} = 8 \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

L'insertion de l'élément  $t_{(2,6)}^e = 1$  dans la matrice W est effectuée suivant les équations (1.20), (1.21) et (1.22), sachant que cet élément appartient à la matrice étendue d'endroit « ET » où (  $n = 1$  ,  $i = 2$  ,  $j = 6$  )

$$\left. \begin{aligned} x &= i + (P_{tr1} + P_{tr2} - P_{trn}) \cdot [(i - 1) \setminus P_{trn}] + (n - 1) \\ n = 1 \text{ et } i = 2 &\Rightarrow x = i + (P_{tr1} + P_{tr2} - P_{trn}) \cdot [(i - 1) \setminus P_{trn}] + (n - 1) \\ &\Rightarrow x = 2 + (1 + 1 - 1) \cdot [(2 - 1) \setminus 1] + (1 - 1) \\ &\Rightarrow x = 3 \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

$$\left. \begin{aligned} k &= [(j - 1) \setminus P_{chn}] + [n \setminus c] \\ n = 1 \text{ et } j = 6 &\Rightarrow k = [(6 - 1) \setminus 2] + [1 \setminus 2] = 2 \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

$$\left. \begin{aligned} y &= j + (P_{ch1} + P_{ch2} - P_{chn}) \cdot [(j - 1) \setminus P_{chn}] + (n - 1) + \sum_{m=1}^k (d_{(c,m)} \cdot P_c) \\ n = 1, j = 6 \text{ et } k = 2 &\Rightarrow \\ y &= 6 + (2 + 1 - 2) \cdot [(6 - 1) \setminus 2] + (1 - 1) + \sum_{m=1}^2 (d_{(2,m)} \cdot 1) \\ y &= 8 + [d_{(2,1)} + d_{(2,2)}] = 8 + [0 + 1] \\ y &= 9 \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

Donc, après avoir effectué ces calculs et selon le principe d'insertion  $w_{(x,y)} = t_{(i,j)}^e$ , on trouve que l'élément  $w_{(3,9)} = t_{(2,6)}^e = 1$ , soit : l'élément  $w_{(3,9)}$  de la matrice «W» égal à « 1 ».

L'insertion de l'élément  $b_{(4,3)}^e = 0$  dans la matrice W est effectuée suivant les équations (2.20), (2.21) et (2.22), sachant que cet élément appartient à la matrice étendue d'envers « EB » où ( $n = 2$ ,  $i = 4$ ,  $j = 3$ ) :

$$\begin{aligned}
 & x = i + (P_{tr1} + P_{tr2} - P_{trn}) \cdot [(i - 1) \setminus P_{trn}] + (n - 1) \\
 n = 2 \text{ et } i = 4 & \Rightarrow x = 4 + (1 + 1 - 1) \cdot [(4 - 1) \setminus 1] + (2 - 1) \\
 & \Rightarrow x = 4 + (1) \cdot [3] + (1) \\
 & \Rightarrow x = 8
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} & x = i + (P_{tr1} + P_{tr2} - P_{trn}) \cdot [(i - 1) \setminus P_{trn}] + (n - 1) \\ n = 2 \text{ et } i = 4 & \Rightarrow x = 4 + (1 + 1 - 1) \cdot [(4 - 1) \setminus 1] + (2 - 1) \\ & \Rightarrow x = 4 + (1) \cdot [3] + (1) \\ & \Rightarrow x = 8 \end{aligned}} \right\} (2.29)$$

$$\begin{aligned}
 & k = [(j - 1) \setminus P_{chn}] + [n \setminus c] \\
 n = 2 \text{ et } j = 3 & \Rightarrow k = [(3 - 1) \setminus 1] + [2 \setminus 2] = [2] + [1] = 3
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} & k = [(j - 1) \setminus P_{chn}] + [n \setminus c] \\ n = 2 \text{ et } j = 3 & \Rightarrow k = [(3 - 1) \setminus 1] + [2 \setminus 2] = [2] + [1] = 3 \end{aligned}} \right\} (2.30)$$

$$\begin{aligned}
 & y = j + (P_{ch1} + P_{ch2} - P_{chn}) \cdot [(j - 1) \setminus P_{chn}] + (n - 1) + \sum_{m=1}^k (d_{(c,m)} \cdot P_c) \\
 n = 2, j = 3 \text{ et } k = 3 & \Rightarrow \\
 y = 3 + (2 + 1 - 1) \cdot [(3 - 1) \setminus 1] + (2 - 1) + \sum_{m=1}^3 (d_{(2,m)} \cdot 1) \\
 y = 3 + (2) \cdot [2] + (1) + [d_{(2,1)} + d_{(2,2)} + d_{(2,3)}] = 3 + 6 + [0 + 1 + 0] \\
 y = 10
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} & y = j + (P_{ch1} + P_{ch2} - P_{chn}) \cdot [(j - 1) \setminus P_{chn}] + (n - 1) + \sum_{m=1}^k (d_{(c,m)} \cdot P_c) \\ n = 2, j = 3 \text{ et } k = 3 & \Rightarrow \\ y = 3 + (2 + 1 - 1) \cdot [(3 - 1) \setminus 1] + (2 - 1) + \sum_{m=1}^3 (d_{(2,m)} \cdot 1) \\ y = 3 + (2) \cdot [2] + (1) + [d_{(2,1)} + d_{(2,2)} + d_{(2,3)}] = 3 + 6 + [0 + 1 + 0] \\ y = 10 \end{aligned}} \right\} (2.31)$$

Donc, après avoir effectué ces calculs et selon le principe d'insertion  $w_{(x,y)} = b_{(i,j)}^e$ , on trouve que l'élément  $w_{(8,10)} = b_{(4,3)}^e = 0$ , soit : l'élément  $w_{(3,9)}$  de la matrice « W » égal à « 0 ».

Maintenant, on peut déterminer les positions de la chaîne de liage dans la matrice double étoffe « w ». Comme nous avons vu que les deux couches se relient par deux fils de liage, où  $R_c = 2$  et donc  $j = 1$  et  $j = 2$ . Ces deux fils de liage seront positionnés dans la matrice « w » suivant les équations (2.23) et (2.24). En prenant comme un exemple, le fil de liage  $j = 2$ , il est possible de trouver le petit nombre « s » qui vérifie l'inégalité (2.23) ci-après :

$$\left. \begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^s (d_{(c,k)} \cdot P_c) \geq j \quad \text{pour: } 1 \leq s \leq M_{ch} \quad ; P_c = 1 \text{ et } M_{ch} = 4 \\
 & \sum_{k=1}^s (d_{(2,k)}) \geq 2 \Leftrightarrow \quad \text{pour: } 1 \leq s \leq 4 \\
 & \text{pour } s = 1, \text{ on aura : } \sum_{k=1}^1 (d_{(2,k)}) = d_{(2,1)} = 0 \not\geq 2 \quad \text{réfuté} \\
 & \text{pour } s = 2, \text{ on aura : } \sum_{k=1}^2 (d_{(2,k)}) = d_{(2,1)} + d_{(2,2)} = 1 \not\geq 2 \quad \text{réfuté} \\
 & \text{pour } s = 3, \text{ on aura : } \sum_{k=1}^3 (d_{(2,k)}) = d_{(2,1)} + d_{(2,2)} + d_{(2,3)} = 1 \not\geq 2 \quad \text{réfuté} \\
 & \text{pour } s = 4, \text{ on aura : } \sum_{k=1}^4 (d_{(2,k)}) = d_{(2,1)} + d_{(2,2)} + d_{(2,3)} + d_{(2,4)} = 2 = 2 \quad \text{accepté}
 \end{aligned} \right\} (2.32)$$

Donc, le plus petit nombre est  $s=4$ .

De l'équation (2.24), on trouve la position du fil de liage  $j = 2$  comme suit :

$$\left. \begin{aligned}
 & y = j + [s \cdot P_{ch1}] + [s - (3 \text{ Mod } c)] \cdot P_{ch2} \\
 & y = 2 + [(4) \cdot (2)] + [4 - (3 \text{ Mod } 2)] \cdot (1) = 2 + [8] + [3] \\
 & y = 13
 \end{aligned} \right\} (2.33)$$

De la même façon, on trouve tous les éléments  $w_{(x,y)}$  pour obtenir la matrice suivante :

$$W = \begin{bmatrix} & E & E & e & E & E & FL & e & E & E & e & E & E & FL & e \\ e & - & - & 1 & - & - & - & 0 & - & - & 0 & - & - & - & 1 \\ E & 1 & 0 & - & 0 & 1 & - & - & 1 & 0 & - & 0 & 1 & - & - \\ e & - & - & 0 & - & - & - & 0 & - & - & 1 & - & - & - & 1 \\ E & 0 & 0 & - & 1 & 1 & - & - & 0 & 0 & - & 1 & 1 & - & - \\ e & - & - & 0 & - & - & - & 1 & - & - & 1 & - & - & - & 0 \\ E & 0 & 1 & - & 1 & 0 & - & - & 0 & 1 & - & 1 & 0 & - & - \\ e & - & - & 1 & - & - & - & 1 & - & - & 0 & - & - & - & 0 \\ E & 1 & 1 & - & 0 & 0 & - & - & 1 & 1 & - & 0 & 0 & - & - \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

### 5.1.5 Levées de fils :

Les levées de fil indiquent que les chaînes d'endroit et les fils de liage sont levés sur les duites d'envers dans un tissu double couche lié par fil de liage. Identifier les levées de fil et les placer dans la matrice  $W$  nécessitent la détermination des couches à laquelle les éléments  $x$  et  $y$  du  $w_{(x,y)}$  appartiennent.

Donc, la première étape est de calculer l'identificateur de chaîne «  $p$  » et l'identificateur de trame «  $q$  » du tissu auquel la chaîne «  $y$  » et la trame «  $x$  » appartiennent.

Premièrement, le calcul de l'identificateur de chaîne «  $p$  » consiste à trouver le plus petit nombre «  $m$  » qui vérifie l'inégalité suivante :

$$m \cdot (P_{ch1} + P_{ch2}) + \sum_{k=1}^m (d_{(c,k)} \cdot P_c) \geq y \quad \text{pour : } \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq m \leq M_{ch} \\ 1 \leq y \leq R_{ch} \end{array} \right\} \quad (2.35)$$

Puis, l'identificateur de chaîne «  $p$  » peut être trouvé à partir de l'équation suivante :

$$p = y - P_{ch1} - [(m - 1) \cdot (P_{ch1} + P_{ch2})] - \sum_{k=1}^{m-1} (d_{(c,k)} \cdot P_c) \quad (2.36)$$

Deuxièmement, le calcul de l'identificateur de trame «  $q$  » pour  $x = 1$  à  $P_{tr2}$  peut être calculé à partir de l'équation suivante[36][35] :

$$q = [x \text{ MOD } (P_{tr1} + P_{tr2})] + (P_{tr1} + P_{tr2}) \cdot \left[ [x \setminus (P_{tr1} + P_{tr2})] \setminus \left[ \frac{x}{(P_{tr1} + P_{tr2})} \right] \right] \quad (2.37)$$

La deuxième étape est de comparer les valeurs des identificateurs «  $p$  » et «  $q$  » avec les conditions de la définition de la couche, ces conditions se résument comme suit:

$$\left. \begin{array}{l}
 1). Si : 0 < q \leq P_{tr1} \quad \Leftrightarrow x \in \text{tissu d'endroit}, n_{(x)} = 1 \\
 2). Si : P_{tr1} < q \leq (P_{tr1} + P_{tr2}) \quad \Leftrightarrow x \in \text{tissu d'envers}, n_{(x)} = 2 \\
 3). Si : -P_{ch1} < p \leq 0 \quad \Leftrightarrow y \in \text{tissu d'endroit}, n_{(y)} = 1 \\
 4). Si : [(3 \text{ MOD } c) \cdot (d_{(c,m)} \cdot P_c)] < p \leq [P_{ch2} + (3 \text{ MOD } c) \cdot (d_{(c,m)} \cdot P_c)] \quad \Leftrightarrow y \in \text{tissu d'envers}, n_{(y)} = 2 \\
 5). Si : [(c \setminus 3) \cdot P_{ch2}] < p \leq [(c \setminus 3) \cdot P_{ch2} + (d_{(c,m)} \cdot P_c)] \quad \Leftrightarrow y \in \text{fil de liage}, n_{(y)} = 3
 \end{array} \right\} (2.38)$$

Suivant la définition de la levée de fil, si la trame «  $x$  » appartient au tissu d'envers et si la chaîne «  $y$  » appartient au tissu d'endroit ou aux fils de liage, alors l'entrecroisement entre ces deux fils qui est représenté par l'élément  $w_{(x,y)}$  est une levée de fil, et donc  $w_{(x,y)} = 1$ .

Comme mentionné précédemment, lors du tissage du tissu d'endroit, il exige de ne pas lever la chaîne d'envers et les fils de liage lors d'insertion de duite d'endroit. De ce qui précède, nous pouvons déduire que si «  $x$  » appartient au tissu d'endroit et «  $y$  » appartient au tissu d'envers ou aux fils de liage, alors l'entrecroisement entre ces deux fils qui est représenté par l'élément  $w_{(x,y)}$  n'est pas une levée de fil, donc  $w_{(x,y)} = 0$ . Ces contraintes sont résumées dans le tableau 1.3.

Tableau 1. 3: Contraintes de levée des fils

$n_{(x)}$	$n_{(y)}$	$w_{(x,y)}$	Levée de fil	
1	2	0	non	si $n_{(x)} = 1$ et $n_{(y)} \neq n_{(x)}$ , alors : $w_{(x,y)} = 0$
	3			
2	1	1	oui	si $n_{(x)} = 2$ et $n_{(y)} \neq n_{(x)}$ , alors : $w_{(x,y)} = 1$
	3			

Par exemple, pour terminer la matrice  $W$  produit ci-dessus, en tenant compte des éléments  $w_{(x,y)} = w_{(5,7)}$  et  $w_{(x,y)} = w_{(6,13)}$ , la levée de fils doit être vérifiée en fonction des conditions figurant au tableau 3-3.

**Tout d'abord:** pour l'élément  $w_{(x,y)} = w_{(5,7)}$  où :  $x = 5, y = 7$ , et à partir de l'équation (2.35), le plus petit nombre «  $m$  » doit être trouvé:

$$\left. \begin{aligned}
 m \cdot (P_{ch1} + P_{ch2}) + \sum_{k=1}^m (d_{(c,k)} \cdot P_c) &\geq y \\
 m \cdot (2 + 1) + \sum_{k=1}^m (d_{(2,k)} \cdot (1)) &\geq 7 \\
 \text{pour : } m = 1 \Rightarrow (1) \cdot (3) + \sum_{k=1}^1 (d_{(2,k)}) &= 3 + d_{(2,1)} \\
 &= 3 + 1 = 4 \quad \not\geq 7 \text{ Rejeté} \\
 \text{pour : } m = 2 \Rightarrow (2) \cdot (3) + \sum_{k=1}^2 (d_{(2,k)}) &= 6 + (d_{(2,1)} + d_{(2,2)}) \\
 &= 6 + (1 + 1) = 8 \quad > 7 \text{ Accepté}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

Alors, l'inégalité (2.35) est vérifiée quand : m=2.

Les conditions des identificateurs de couche précédemment mentionnées (2.38) doivent être trouvées conformément aux paramètres de tissu, ils sont:

- 1) Si  $(0 < q \leq 1)$ , alors x appartient à la couche supérieure,  $n_{(x)} = 1$
- 2) Si  $(1 < q \leq 2)$ , alors x appartient à la couche inférieure,  $n_{(x)} = 2$
- 3) Si  $(-2 < p \leq 0)$ , alors y appartient à la couche supérieure,  $n_{(y)} = 1$
- 4) Si  $(1 < p \leq 2)$ , alors y appartient à la couche inférieure,  $n_{(y)} = 2$
- 5) Si  $(0 < p \leq 1)$ , alors cette chaîne y appartient aux chaînes de liage,  $n_{(y)} = 3$

Donc, pour la chaîne  $y = 7$ , l'identificateur « p » est calculé d'après l'équation (2.36) comme suit:

$$p = 7 - 2 - [(2 - 1) \cdot (2 + 1)] - \sum_{k=1}^{2-1} (d_{(2,k)} \cdot (1)) = 2 \quad (2.40)$$

En ce qui concerne la trame  $x = 5$ , l'identificateur « q » peut être calculé à partir de l'équation (2.37):

$$q = [5 \text{ MOD } (1 + 1)] + (1 + 1) \cdot \left[ [5 \setminus (1 + 1)] \setminus \left[ \frac{5}{(1 + 1)} \right] \right] = 1 \quad (2.41)$$

En se référant aux conditions d'identification des couches, on trouve que la chaîne  $y = 7$  appartient au tissu d'envers soit  $n_{(y)} = 2$ , alors que la trame  $x = 5$  appartient au tissu d'endroit soit  $n_{(x)} = 1$ . Selon le tableau (2.3), on trouve que  $n_{(x)} = 1$ ,  $n_{(y)} = 2$  et  $n_{(y)} \neq n_{(x)}$ , donc:  $W_{(5,7)} = 0$ , et la levée du fil n'est pas faite dans cette intersection.



**Deuxièmement:** pour l'élément :  $W_{(6,13)}$  où  $x = 6$  et  $y = 13$  , en suivant les mêmes étapes, nous trouvons ce qui suit:

$m = 4$  ,  $p = 1$  ,  $q = 2$  ,  $n_{(x=6)} = 2$  ,  $n_{(y=13)} = 3$ , donc le fil  $x = 6$  appartient au tissu d'envers et le fil  $y = 13$  est un fil de liage. En se référant aux conditions de levée de fil (tableau 1.3), on trouve que  $n_{(x)} = 2$  ,  $n_{(y)} = 3$  et  $n_{(y)} \neq n_{(x)}$  , donc  $W_{(6,13)} = 1$  et le fil est levé dans cette intersection.

La vérification de toutes les levées de fils pour tous les éléments de la matrice nous donne la matrice suivante :

$$W = \begin{bmatrix} & E & E & e & E & E & FL & e & E & E & e & E & E & FL & e \\ e & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ E & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ e & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ E & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ e & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ E & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ e & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ E & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Cette matrice  $W$  représente les armures du tissu d'endroit, du tissu d'envers et les fils de liage. Le liage des deux tissus par les chaînes de liage n'est pas encore fait.

Pour déterminer que la trame  $x$  représente la  $i^{\text{ème}}$  trame de la couche  $n_{(x)}^{\text{ème}}$  , l'équation suivante peut être utilisée pour calculer l'indice  $i$  :

$$i = [x \setminus (P_{tr1} + P_{tr2})] \cdot P_{trn} + [q - (n_{(x)} - 1) \cdot P_{tr1}] \quad (2.43)$$

Dans un procédé similaire, la chaîne  $y$  représente la  $j^{\text{ème}}$  chaîne de la couche  $n_{(y)}^{\text{ème}}$  et  $j$  peut être calculé comme suit:

$$j = p + (1 \setminus n_{(y)}) \cdot P_{ch1} + [(m - 1) \cdot [1 - (n_{(y)} \setminus 3)]] \cdot P_{chn} - [(n_{(y)} \setminus 3) \cdot (c - 2)] \cdot P_{ch2} + \left( \left[ (n_{(y)} \setminus 3) \cdot \sum_{k=1}^{m-1} d_{(c,k)} \right] - (3 \text{ MOD } n_{(y)}) \cdot (3 \text{ MOD } c) \right) \cdot P_c \quad (2.44)$$

Où le paramètre  $m$  se calcule à partir de l'équation (2.35).

Remarque : Quand  $n = 3$  , on remplace  $P_{ch3}$  par  $P_c$  .

Pour vérifier les précédentes équations, on prend l'élément  $W_{(5,7)}$  calculé précédemment où:

$$\begin{aligned} n_{(x)} &= 1 & n_{(y)} &= 2 & c &= 2 & m &= 2 & q &= 1 & p &= 2 \\ P_{ch1} &= 2 & P_{tr1} &= 1 & P_{ch2} &= 1 & P_{tr2} &= 1 & P_c &= 1 \end{aligned}$$

Pour  $x = 5$  et à partir de l'équation (1.42) , on trouve :

$$i = [5 \setminus (1 + 1)].1 + [1 - (1 - 1).1] \Rightarrow i = 3 \quad (2.45)$$

Pour  $y = 7$  et à partir de l'équation (2.43) , on trouve :

$$\left. \begin{aligned} j &= 2 + (1 \setminus 2).2 + [(2 - 1).[1 - (2 \setminus 3)]] . 2 - [(2 \setminus 3).(2 - 2)]1 \\ &+ \left( \left[ (2 \setminus 3). \sum_{k=1}^{2-1} d_{(2,k)} \right] - (3 \text{ MOD } 2).(3 \text{ MOD } 2) \right) . 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow j = 2 \quad (2.46)$$

Donc, on trouve que la 5<sup>ème</sup> ligne de la matrice  $W$  représente la 3<sup>ème</sup> trame du tissu d'endroit, alors que la 7<sup>ème</sup> colonne de la matrice  $W$  représente la 2<sup>ème</sup> chaîne du tissu d'envers.

### 5.1.6 Génération des points de liage possibles :

Pour obtenir un double tissu lié par fils de liage, les points de liage sont produits en introduisant les fils de liage entre les deux couches. Deux types des points de liage doivent être produits ; un point d'ascension « **Λ** » et un point de descension « **V** ». (Cf. 2.1.1.2 Mode d'assemblage : liage par des fils spéciaux).

L'intersection entre un fil de liage «  $y$  » et la trame du tissu d'endroit «  $x$  » donne un point d'ascension si la trame passe sous le fil de liage. Dans ce cas, l'élément  $W_{(x,y)}$  prend la valeur « 1 » dans la matrice « **W** » .

Au contraire, l'intersection entre un fil de liage «  $y$  » et de la trame du tissu d'envers «  $x$  » produit un point de descension si la trame passe sur le fil de liage. La valeur (0) est donnée à l'élément  $W_{(x,y)}$  dans la matrice « **W** » .

Tel qu'il est mentionné précédemment, le rôle des points de liage est de lier les deux couches ensemble. Les points peuvent être visibles ou invisibles selon le domaine d'utilisation de tissus. De ce point de vue, on peut mettre quelques conditions pour faire le point de liage.

Dans la matrice  $W$ , considérons que «  $y$  » est un fil de liage, cela entraîne qu'il doit être lié à la couche «  $n^{th}$  » (couche supérieure ou inférieure), sur l'hypothèse que le point doit être effectué à l'intersection correspondant à l'élément  $W_{(x,y)}$ . Donc ce point doit se trouver entre deux éléments adjacents  $W_{(x,y1)}$  ou  $W_{(x,y2)}$ , de la même couche «  $n$  » à laquelle appartient la trame «  $x$  », c'est-à-dire que : «  $n_{(x)} = n_{(y1)}$  ». Toutes les conditions citées précédemment peuvent être illustrés dans le tableau 1.4.

Tableau 1. 4: Conditions de liage

1 <sup>ère</sup> cas						
Ordre des chaînes	$n_{(x)}$	$n_{(y1)}$	$w_{(x,y1)}$	$w_{(x,y2)}$	$W_{(x,y)}$	Type de point du liage
E.FL.e	1	1	1	1	1	Ascension
			1	0		
			0	1		
E.e.FL	2	2	0	0	0	Descension
			1	0		
			0	1		
$\alpha = 1, \varepsilon = 1, \gamma = \beta$						
2 <sup>ème</sup> cas						
Ordre des chaînes	$n_{(x)}$	$n_{(y1)}$	$w_{(x,y1)}$	$w_{(x,y2)}$	$W_{(x,y)}$	Type de point du liage
E.e.FL	1	1	1	1	1	Ascension
			1	0		
			0	1		
E.FL.e	2	2	0	0	0	Descension
			1	0		
			0	1		
$\alpha = P_c, \varepsilon = \beta, \gamma = 1$						

Dans ce tableau, les paramètres et les symboles sont définis comme suit:

$y$  : Représente un fil de liage, il peut être calculé à partir de l'équation (2.24) pour  $j = 1$  à  $R_c$ .

$n_{(x)}$  : est la couche à la quelle la trame  $x$  appartient, il peut être calculé à partir des équations (2.37) et (2.38).

$y_1$  et  $y_2$  : Deux chaînes consécutives de la même couche, un point de liage entre elles peut être produit par le fil de liage étudié  $y$ . Le calcul de  $y_1$  et  $y_2$  est fait à partir des équations suivantes :

$$y_1 = y + \alpha - \varepsilon - (j \text{ MOD } P_c) - [P_c \cdot [(j \setminus P_c) \setminus (j / P_c)]] \quad (2.47)$$

$$y_2 = (y + \alpha + \gamma + P_{ch} - (j \text{ MOD } P_c) - [P_c \cdot [(j \setminus P_c) \setminus (j / P_c)]]) \text{ MOD } P_{ch} \quad (2.48)$$

$\left. \begin{array}{l} \text{si : } y_2 = 0, \text{ alors ; on prend } y_2 = P_{ch} \\ \text{si : } y_1 = 0, \text{ alors ; on prend } y_1 = P_{ch} \end{array} \right\}$

$\alpha, \varepsilon, \gamma$  et  $\beta$  sont des paramètres en fonction des proportions de chaînes, ordre des chaînes **E.e.FL** ou **E.FL.e**, la couche  $n_{(x)}$  à la quelle appartient la trame  $x$  et la couche  $n_{(y_1)}$  à la quelle appartient la chaîne  $y_1$ .

Les équations (2.36) et (2.38) peuvent être utilisées pour identifier la couche  $n_{(y_1)}$  sachant que  $y_2$  appartient à la même couche que  $y_1$ .

Le paramètre  $\beta$  peut être calculé à partir de l'équation suivante :

$$\beta = P_{ch1} + P_{ch2} + P_c - P_{chn_{(y_1)}} \quad (2.49)$$

Pour illustrer les précédentes conditions et équations, on prendra l'exemple suivant :

Considérons que le fil de liage  $j = 2$  où  $1 \leq j \leq (R_c = 2)$ , l'insertion de cette chaîne dans la matrice  $W$  en utilisant les équations (2.23) et (2.24), nous donne  $y = 13$

Maintenant, pour la trame  $x = 5$ , prenant l'intersection  $W_{(x,y)} = W_{(5,13)}$ , on trouve à partir des équations (2.37) et (2.38) que  $n_{(x)} = 1$ . Dans notre exemple, les chaînes sont dans l'ordre « E.FL.e ».

Du tableau 3-4, on trouve que :  $\alpha = 1$ ,  $\varepsilon = 1$ , et  $\gamma = \beta$ .

Puis on calcule  $y_1$  à partir de l'équation (2.46) :

$$y_1 = 13 + 1 - 1 - (2 \text{ MOD } 1) - [1 \cdot [(2 \setminus 1) \setminus (2 / 1)]] = 12$$

Puis on trouve la couche à la quelle le fil  $y_1$  appartient en appliquant les équations (2.36) et (2.38).  $n_{(y_1)} = 1$  et donc  $P_{chn_{(y_1)}} = P_{ch1} = 2$ .

Le paramètre  $\beta$  est calculé de l'équation (2.48):  $\beta = 2 + 1 + 1 - 2 = 2$ , donc  $\gamma = \beta = 2$ . Puis on calcule  $y_2$  de l'équation (2.47):

$$y_2 = (13 + 1 + 2 + 14 - (2 \text{ MOD } 1) - [1. [(2 \setminus 1) \setminus (2 / 1)]]) \text{ MOD } 14 = 1$$

Donc, à partir de la matrice  $W$  on trouve que l'intersection  $W_{(x,y_1)} = W_{(5,12)} = 1$  et l'intersection  $W_{(x,y_2)} = W_{(5,1)} = 0$ . Selon les conditions mentionnées dans le tableau (2-4), l'intersection  $W_{(x,y)} = W_{(5,13)}$  doit prendre la valeur 1, et un point de liage est fait à cette intersection, et c'est un point d'ascension.

De la même manière, on peut trouver tous les points de liage possibles pour  $x = 1$  à  $R_{tr}$  et pour  $j = 1$  à  $R_c$ .

Dans la matrice  $W$ , les points de liage sont les intersections suivantes :

$$\begin{aligned} \text{points d'ascension : } & w_{(1,6)} = 1, & w_{(5,6)} = 1, & w_{(7,6)} = 1 \\ & w_{(1,13)} = 1, & w_{(5,13)} = 1, & w_{(7,13)} = 1 \\ \text{points de descension: } & w_{(4,6)} = 0, & w_{(6,6)} = 0, & w_{(8,6)} = 0 \\ & w_{(2,13)} = 0, & w_{(4,13)} = 0, & w_{(8,13)} = 0 \end{aligned}$$

Enfin, la matrice suivante représente une double couche liée par des fils de liage spéciaux avec le maximum liage possible:

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1,E & 2,E & 3,e & 4,E & 5,E & 6,FL & 7,e & 8,E & 9,E & 10,e & 11,E & 12,E & 13,FL & 14,e \end{matrix} \\ \left[ \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \right. & \begin{matrix} 8,e \\ 7,E \\ 6,e \\ 5,E \\ 4,e \\ 3,E \\ 2,e \\ 1,E \end{matrix} \end{matrix} \quad (2.50)$$

Un autre module mathématique a été développé dans notre recherche pour générer automatiquement les armures de liage selon la densité de liage désiré.

## 5.2. Description du module programmatique :

Le module mathématique développé a été vérifié par un logiciel écrit par Visual Basic « VB6 ». Dans ce logiciel, la première étape consiste à définir tous les paramètres de tissu d'endroit et d'envers « les proportions de chaînes et de trames, les rapports de chaînes et de trames, les armures, le diagramme d'ordre de proportion de chaînes, ...etc. ». Tous les diagrammes de tissages seront automatiquement créés en fonction des paramètres insérés. Le concepteur va créer les armures d'endroit et d'envers selon le motif désiré. Le diagramme de l'ordre des proportions des chaînes doit être marqué en fonction de la position de fils de liage dans le tissu définitif. La figure 2.8 représente l'interface d'identification et de la conception du double tissu décrit en figure 2.5.

Dans la deuxième étape, les armures seront automatiquement traitées et le tissu à double couche avec tous les points de liage possibles sera généré et visualisé dans une autre fenêtre, (figure 2-9).

Après la sélection des points de liage désirés, le double tissu définitif sera généré et visualisé dans une fenêtre séparée.

The screenshot shows a software window titled 'Form1' with two tabs: 'Weave Identification' (selected) and 'Extended Weave'. The interface is organized into three main panels:

- Top Weave:** Contains 'Arrangement' (Warp: 2, Weft: 1) and 'Weave Repeat' (Warp: 4, Weft: 4) sections, along with a 4x4 grid diagram showing a blue and white pattern.
- Back Weave:** Contains 'Arrangement' (Warp: 1, Weft: 1) and 'Weave Repeat' (Warp: 4, Weft: 4) sections, along with a 4x4 grid diagram showing a grey and white pattern.
- Centre Warps:** Contains 'Arrangement' (1) and 'Repeat' (2) dropdowns, a 'Warps Order Diagram' with radio buttons for 'T-B-C Order' and 'T-C-B Order' (selected), a 'Change Order' button, and a 3x4 grid diagram with labels F, C, B and values 0.

A 'NEXT' button is located at the bottom right of the interface.

Figure 2. 8: L'interface d'identification et de la conception du tissu double couche

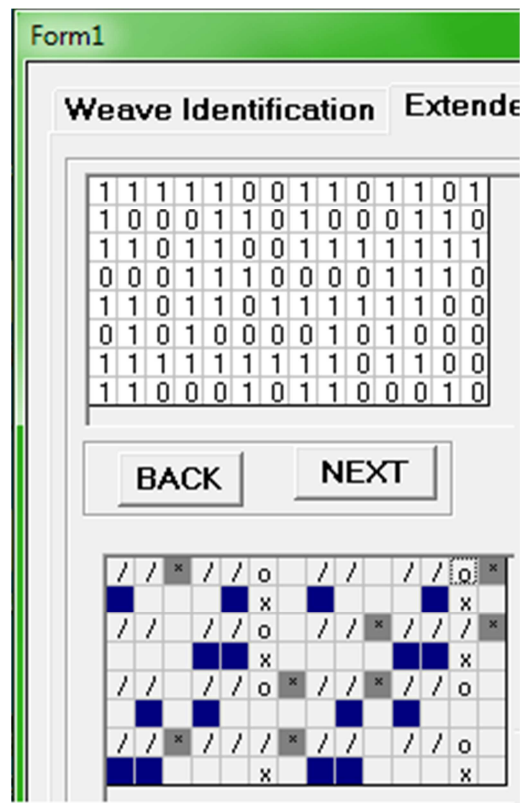


Figure 2. 9: L'interface de génération des points de liage pour la double étoffe

### 5.3. Conclusion :

Un tissu double couches est un type de structure tissée composée de deux couches supérieure et inférieure assemblées entre elles par des moyens différents tels que auto liage, un double liage, fils de liage spéciaux,..... etc.

Le double tissu lié par des fils de liage spéciaux a été décrit mathématiquement et puis automatiquement généré par le développement du module mathématique programmable. Dans ce logiciel, après l'identification de ce tissu, un diagramme d'armure sera créé, montrant tous les points de liage possibles. Le concepteur sélectionne les points requis pour générer automatiquement l'armure définitive qui est prêt à être transféré à la machine à tisser.

## **6. CAAO pour un tissu triple couches :**

### **6.1. CAAO pour un tissu triple couche auto- lié:**

Comme il est mentionné précédemment, ce type de tissu est formé de trois couches superposées et liées entre elles par différents modes : Liage par ascension «  $\Lambda$  », liage par descension «  $V$  », double liage par la couche intermédiaire «  $\Lambda V$  », double liage par les couches extérieures «  $V\Lambda$  ».

Chen et Potiyaraj [36] ont proposé un algorithme mathématique programmable traitant les différents modes d'assemblage d'une étoffe multicouche auto-liée. Cette approche est basée sur la description des armures par matrices binaires et sur l'application des fonctions mathématiques. Ces chercheurs ont développé un logiciel de démonstration écrit en Visual Basic, capable de générer les armures de tous tissus multicouches auto-lié (2,3, et 4 couches).

Comme il est montré dans leur recherche publiée, avec ce logiciel et dans la première étape, on doit sélectionner le nombre des couches à générer, puis identifier les couches (rapport de tissu, proportion des fils et type d'armure). Suite à cette identification des couches, le logiciel va générer toutes les armures individuellement ainsi que l'armure définitive. D'autres options sont disponibles dans ce logiciel, comme : visualiser des coupes en chaîne et en trame, génération des plans (draft et lifting plans), ..., etc.

Dans la deuxième partie de notre recherche, nous allons chercher les propriétés mécaniques d'un tissu triple couches en fonction de taux de liage, duitage, et l'armure. Compte tenu des difficultés qu'on a rencontrées pendant l'étape de la sélection manuelle des armures et le taux de liage, on a pensé à s'appuyer sur une méthode plus efficace. Cette méthode se fonde sur la programmation du module mathématique décrit par Chen et Potiyaraj [36]. Après avoir procédé à quelques modifications, notre logiciel sera adapté au tissu triple couches à étudier.

Par ailleurs, ces modifications ont été apportées seulement sur les conditions de la détermination des points de liage entre les différentes couches. Car selon Chen et Potiyaraj



[36], un point de liage est valide quand ce point n'a pas une interférence avec le tissu dans le sens chaîne ou le sens trame, c'est-à-dire que le point de liage doit être invisible sur la surface du tissu.

Puisque le tissu que nous allons étudier est un tissu triple couches auto-lié destiné aux applications techniques, il n'est pas nécessaire que le point de liage soit invisible.

Par ailleurs, pour effectuer des tests dans le but de comprendre l'action des paramètres de l'étoffe (distribution des points de liage ou armure de liage, armures de différentes couches, densité de liage ou taux de liage) sur ses propriétés mécaniques et physiques, je me suis dans un premier temps penché sur la formalisation des armures permettant par la suite de générer les différents liages possibles suivant les armures et la densité de liage choisie.

Donc, nous aurons besoin de connaître tous les points de liage possibles et ensuite nous aurons à évaluer les perspectives d'assemblage des couches sous certaines conditions. Ces conditions seront exposées ultérieurement. De ce point de vue, nous avons donc dû modifier les modalités de détermination des points de liage ou plutôt nous avons dû imposer de nouvelles conditions qui sont compatibles avec notre étude.

Pour clarifier ce qu'il est mentionné précédemment et savoir comment générer les armures d'un tissu triple couche selon l'algorithme développé par Chen et Potiyaraj, nous pouvons vous proposer un exemple de génération automatique d'un tissu triple couche (sujet de recherche), et ensuite discuter des nouvelles conditions qui permettent la génération automatique de toutes les points de liage possibles.

## **6.2. Description du module programmatique :**

### **6.2.1 Identification mathématique des armures:**

La figure 3.1 représente une triple étoffe non lié, elle est définie comme suit :

- Type du tissu : Triple étoffe.
- Définition du tissu d'endroit, «1» :  
Armure : toile.

- Rapport d'armure : 4 en chaîne et 4 en trame.
- Définition du tissu d'intermédiaire, «2» :
  - Armure : Sergé 4, sens de gauche à droit.
  - Rapport d'armure : 4 en chaîne et 4 en trame.
- Définition du tissu d'envers, «3» :
  - Armure : toile.
  - Rapport d'armure : 4 en chaîne et 4 en trame.
- Proportion des chaînes dans le tissu : 1E :1M:1e
- Type d'assemblage : Liage par les chaînes de la couche intermédiaire (double liage « ΛV »).
- Méthode de Rentrage : rentrage suivi.
- Piquage : 3fils/dent.

Toutes les armures sont vues de l'endroit.

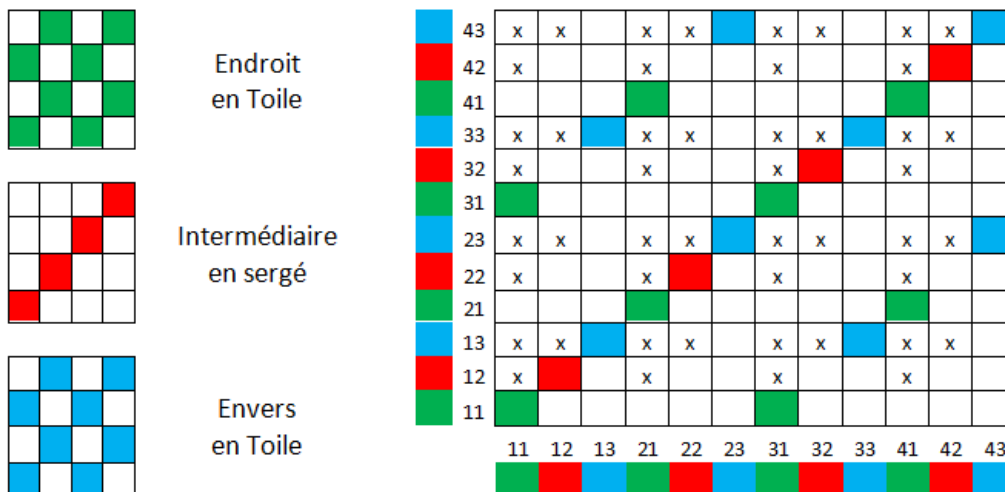


Figure 3. 1 : Armure du tissu triple couches non liées

La première étape consiste à définir les paramètres des armures comme suit:

$P_{ch1}, P_{tr1}$  : Proportion de chaîne et Proportion de trame pour le tissu d'endroit.

$P_{ch2}, P_{tr2}$  : Proportion de chaîne et Proportion de trame pour le tissu d'intermédiaire.

$P_{ch3}, P_{tr3}$  : Proportion de chaîne et Proportion de trame pour le tissu d'envers.

$$P_{ch1} = P_{ch2} = P_{ch3} = 1 \quad , \quad P_{tr1} = P_{tr2} = P_{tr3} = 1$$

$r_{ch1}, r_{tr1}$  : Rapport de chaîne et Rapport de trame pour le tissu d'endroit.

$r_{ch2}, r_{tr2}$  : Rapport de chaîne et Rapport de trame pour le tissu d'intermédiaire.

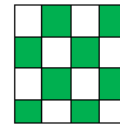
$r_{ch3}, r_{tr3}$  : Rapport de chaîne et Rapport de trame pour le tissu d'envers.

$$r_{ch1} = r_{ch2} = r_{ch3} = 4 \quad , r_{tr1} = r_{tr2} = r_{tr3} = 4$$

La représentation mathématique d'armure (Figure 3.2) est faite par une matrice binaire dont les éléments sont 0 et 1.

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

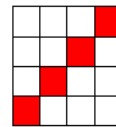
La matrice d'endroit « T »



L'armure d'endroit

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

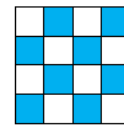
La matrice d'envers « B »



L'armure d'intermédiaire

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

La matrice d'envers « B »



L'armure d'envers

Figure 3. 2: Représentation mathématique des armures du tissu triple couches.

### 6.2.2 Génération mathématique des armures

Une extension d'armure doit être effectuée selon la proportion de la chaîne et de la trame de chaque tissu.

La matrice d'endroit « T » dont les éléments sont  $t_{(i,j)}$  doit être étendue à la matrice « ET » dont les éléments sont  $t_{(x,y)}^e$ .

La matrice d'intermédiaire « M » dont les éléments sont  $m_{(i,j)}$  doit être étendue à la matrice « EM » dont les éléments sont  $m_{(x,y)}^e$ .

La matrice d'envers « **B** » dont les éléments sont  $b_{(i,j)}$  doit être étendue à la matrice « **EB** » dont les éléments sont  $b_{(x,y)}^e$ .

Premièrement, on calcule le nombre de répétition d'armure dans le sens chaîne par la formule suivante:

$$M_{chn} = \frac{M_{ch} \cdot P_{chn}}{r_{chn}} \quad (3.1)$$

Où :

**n** : Nombre de couches, (n=1 pour le tissu d'endroit, n=2 pour le tissu d'intermédiaire, et n=3 pour le tissu d'envers)

**Mod** : L'opérateur de modulo, qui donne le reste de la division entre deux nombres.

**M<sub>chn</sub>** : Nombre de répétition au sens chaîne

**M<sub>ch</sub>** : Le plus petit nombre qui rend cette équation égale à zéro :

$$(M_{ch} \cdot P_{ch1}) \text{ Mod } r_{ch1} = (M_{ch} \cdot P_{ch2}) \text{ Mod } r_{ch2} = (M_{ch} \cdot P_{ch3}) \text{ Mod } r_{ch3} = 0 \quad (3.2)$$

Deuxièmement, on calcule le nombre de répétitions d'armure dans le sens trame par la formule suivante:

$$M_{trn} = \frac{M_{tr} \cdot P_{trn}}{r_{trn}} \quad (3.3)$$

Où :

**M<sub>trn</sub>** : Nombre de répétition au sens trame

**M<sub>tr</sub>** : Le plus petit nombre qui rend cette équation égale à zéro :

$$(M_{tr} \cdot P_{tr1}) \text{ Mod } r_{tr1} = (M_{tr} \cdot P_{tr2}) \text{ Mod } r_{tr2} = (M_{tr} \cdot P_{tr3}) \text{ Mod } r_{tr3} = 0 \quad (3.4)$$

Puis, on calcule les rapports des armures étendues des trois tissus à partir des formules suivantes :

$$R_{chn} = M_{chn} \cdot r_{chn} \quad (3.5)$$

$$R_{trn} = M_{trn} \cdot r_{trn} \quad (3.6)$$

Où :

$R_{chn}, R_{trn}$  : Le rapport d'armure étendue au sens chaîne et au sens trame respectivement de chaque tissu.

En appliquant les formules précédentes dans notre exemple, on trouve que :

- L'équation 3.2 est égale à zéro quand  $M_{ch} = 4$  :

$$[(4) \cdot (1)] \text{ Mod } 4 = [(4) \cdot (1)] \text{ Mod } 4 = [(4) \cdot (1)] \text{ Mod } 4 = 0$$

- De l'équation 3.1, on tire:

$$M_{ch1} = \frac{M_{ch} \cdot P_{ch1}}{r_{ch1}} = \frac{(4) \cdot (1)}{4} = 1$$

$$M_{ch2} = \frac{M_{ch} \cdot P_{ch2}}{r_{ch2}} = \frac{(4) \cdot (1)}{4} = 1$$

$$M_{ch3} = \frac{M_{ch} \cdot P_{ch3}}{r_{ch3}} = \frac{(4) \cdot (1)}{4} = 1$$

- De la même manière et à partir des équations 3.4 et 3.3, on trouve les paramètres suivants :

$$M_{tr} = 4 \quad , \quad M_{tr1} = 1 \quad , \quad M_{tr2} = 1 \quad , \quad M_{tr3} = 1.$$

- En appliquant les équations 3.5 et 3.6, on calcule les rapports des tissus étendus :

$$R_{ch1} = M_{ch1} \cdot r_{ch1} = (1) \cdot (4) = 4$$

$$R_{ch2} = M_{ch2} \cdot r_{ch2} = (1) \cdot (4) = 4$$

$$R_{ch3} = M_{ch3} \cdot r_{ch3} = (1) \cdot (4) = 4$$

$$R_{tr1} = M_{tr1} \cdot r_{tr1} = (1) \cdot (4) = 4$$

$$R_{tr2} = M_{tr2} \cdot r_{tr2} = (1) \cdot (4) = 4$$

$$R_{tr3} = M_{tr3} \cdot r_{tr3} = (1) \cdot (4) = 4$$

La génération automatique des matrices étendues des armures se faite comme suivant:

$$\left. \begin{array}{l}
 t_{(i,j)} \rightarrow ET \Leftrightarrow t_{(x,y)}^e = t_{(i,j)} \quad \begin{array}{l} \text{pour } i = 1 \text{ à } r_{tr1} \\ \text{pour } j = 1 \text{ à } r_{ch1} \end{array} \\
 b_{(i,j)} \rightarrow EB \Leftrightarrow b_{(x,y)}^e = b_{(i,j)} \quad \begin{array}{l} \text{pour } i = 1 \text{ à } r_{tr2} \\ \text{pour } j = 1 \text{ à } r_{ch2} \end{array} \\
 m_{(i,j)} \rightarrow EM \Leftrightarrow m_{(x,y)}^e = m_{(i,j)} \quad \begin{array}{l} \text{pour } i = 1 \text{ à } r_{tr3} \\ \text{pour } j = 1 \text{ à } r_{ch3} \end{array}
 \end{array} \right\} (3.7)$$

L'insertion des éléments  $t_{(i,j)}$  dans la matrice ET ainsi que les éléments  $b_{(i,j)}$  dans la matrice EB sont effectués suivant les équations suivantes:

$$x = i + R_{trn} - h \cdot r_{trn} \quad \text{pour } h = 1, 2, \dots, M_{trn} \quad (3.8)$$

$$y = j + R_{chn} - a \cdot r_{chn} \quad \text{pour } a = 1, 2, \dots, M_{chn} \quad (3.9)$$

Prenant l'élément  $t_{(2,3)}$  comme exemple, cet élément correspondant à  $(i = 2, j = 3)$  devrait être inséré dans la matrice étendue ET en trouvant le couple binaire  $(x, y)$  correspondant de la matrice ET :

$$\begin{aligned}
 \text{De l'équation (2.8): } x &= i + R_{tr1} - h \cdot r_{tr1} \Rightarrow x = 2 + 4 - (h) \cdot (4) = 6 - 4 \cdot (h) \\
 &\text{pour } h = 1 \quad \text{où } M_{tr1} = 1 \quad \Rightarrow x = 2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{De l'équation (2.9): } y &= j + R_{ch1} - a \cdot r_{ch1} \Rightarrow y = 3 + 4 - (a) \cdot (4) = 7 - 4 \cdot (a) \\
 &\text{pour } a = 1 \quad \text{où } M_{ch1} = 2 \quad \Rightarrow y = 3
 \end{aligned}$$

Donc, du couple binaire  $(i = 2, j = 3)$  appartenant à la matrice T, on obtient le couple de binaire  $(x = 2, y = 3)$  qui représentent l'élément  $t_{(2,3)}^e$  appartenant à la matrice étendue ET. Par conséquent, l'élément  $t_{(2,3)} = 1$  sera inséré dans la matrice ET, donc l'élément  $t_{(2,3)}^e$  et prend la même valeur que  $t_{(2,3)}$ , soit :  $t_{(2,3)}^e = t_{(2,3)} = 1$ .

En appliquant le même procédé sur tous les éléments  $t_{(i,j)}$ ,  $m_{(i,j)}$  et  $b_{(i,j)}$ , on obtient tous les éléments des matrices étendus (ET, EM et EB).

$$\begin{aligned}
 T &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \rightarrow ET &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 M &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \rightarrow EM &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \rightarrow EB &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Enfin, on calcule le rapport de l'armure définitif  $W_{(x,y)}$  à partir des formules suivantes :

$$\left. \begin{aligned}
 R_{ch} &= R_{ch1} + R_{ch2} + R_{ch3} \\
 R_{tr} &= R_{tr1} + R_{tr2} + R_{tr3}
 \end{aligned} \right\} \tag{3.11}$$

Dans notre exemple, le rapport en chaîne  $R_{ch} = 12$  et le rapport en trame  $R_{tr} = 12$

### 6.2.3 Insertion des éléments de la matrice définitive du tissu triple :

Chaque élément des matrices étendues « ET », « EM » et « EB » doivent être inséré dans la matrice  $W_{(x,y)}$  comme suit :

$$\left. \begin{aligned}
 ET &\rightarrow W \Leftrightarrow t_{(i,j)}^e = w_{(x,y)} \\
 EM &\rightarrow W \Leftrightarrow m_{(i,j)}^e = w_{(x,y)} \\
 EB &\rightarrow W \Leftrightarrow b_{(i,j)}^e = w_{(x,y)}
 \end{aligned} \right\} \tag{3.12}$$

L'identificateur « x » se calcule à partir de l'équation suivante :

$$x = \left( \left[ \sum_{k=1}^n (P_{trk}) \right] - P_{trn} \right) + \{i - [(i-1) \setminus P_{trn}] \cdot P_{trn}\} + \left\{ [(i-1) \setminus P_{trn}] \cdot \sum_{k=1}^3 (P_{trk}) \right\} \tag{3.13}$$

Tandis que l'identificateur « y » se calcule à partir de l'équation suivante :

$$y = \left( \left[ \sum_{k=1}^n (P_{chk}) \right] - P_{chn} \right) + \{j - [(j-1) \setminus P_{chn}] \cdot P_{chn}\} + \left\{ [(j-1) \setminus P_{chn}] \cdot \sum_{k=1}^3 (P_{chk}) \right\} \tag{3.14}$$

L'insertion de l'élément  $b_{(2,4)}^e = 0$  dans la matrice  $W$  est effectuée suivant les équations (3.13), (3.14) , sachant que cet élément appartient à la matrice étendue d'endroit « ET » où (  $n = 3$  ,  $i = 2$  ,  $j = 4$  ).

$$\begin{aligned}
 x &= \left( \left[ \sum_{k=1}^n (P_{trk}) \right] - P_{trn} \right) + \{i - [(i-1) \setminus P_{trn}] \cdot P_{trn}\} + \left\{ [(i-1) \setminus P_{trn}] \cdot \sum_{k=1}^3 (P_{trk}) \right\} \\
 &= \left( \left[ \sum_{k=1}^3 (P_{trk}) \right] - P_{tr3} \right) + \{2 - [(2-1) \setminus P_{tr3}] \cdot P_{tr3}\} + \{[(2-1) \setminus P_{tr3}] \cdot (P_{tr1} + P_{tr2} + P_{tr3})\} \\
 &= ([P_{tr1} + P_{tr2} + P_{tr3}] - 1) + \{2 - [(2-1) \setminus 1] \cdot 1\} + \{[(2-1) \setminus 1] \cdot (P_{tr1} + P_{tr2} + P_{tr3})\} \\
 &= ([1 + 1 + 1] - 1) + \{2 - [(2-1) \setminus 1] \cdot 1\} + \{[(2-1) \setminus 1] \cdot (1 + 1 + 1)\} \\
 &= ([3] - 1) + \{2 - [(1) \setminus 1] \cdot 1\} + \{[(1) \setminus 1] \cdot (3)\} = 6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y &= \left( \left[ \sum_{k=1}^n (P_{chk}) \right] - P_{chn} \right) + \{j - [(j-1) \setminus P_{chn}] \cdot P_{chn}\} + \left\{ [(j-1) \setminus P_{chn}] \cdot \sum_{k=1}^3 (P_{chk}) \right\} \\
 &= \left( \left[ \sum_{k=1}^3 (P_{chk}) \right] - P_{ch3} \right) + \{4 - [(4-1) \setminus P_{ch3}] \cdot P_{ch3}\} + \{[(4-1) \setminus P_{ch3}] \cdot (P_{ch1} + P_{ch2} + P_{ch3})\} \\
 &= ([3] - 1) + \{4 - [3 \setminus 1] \cdot 1\} + \{[(3) \setminus 1] \cdot (3)\} = 2 + 1 + 9 = 12
 \end{aligned}$$

De la même façon, on trouve tous les éléments  $w_{(x,y)}$  pour obtenir la matrice suivante :

$$W = \begin{bmatrix}
 - & - & 0 & - & - & 1 & - & - & 0 & - & - & 1 \\
 - & 0 & - & - & 0 & - & - & 0 & - & - & 1 & - \\
 0 & - & - & 1 & - & - & 0 & - & - & 1 & - & - \\
 - & - & 1 & - & - & 0 & - & - & 1 & - & - & 0 \\
 - & 0 & - & - & 0 & - & - & 1 & - & - & 0 & - \\
 1 & - & - & 0 & - & - & 1 & - & - & 0 & - & - \\
 - & - & 0 & - & - & 1 & - & - & 0 & - & - & 1 \\
 - & 0 & - & - & 1 & - & - & 0 & - & - & 0 & - \\
 0 & - & - & 1 & - & - & 0 & - & - & 1 & - & - \\
 - & - & 1 & - & - & 0 & - & - & 1 & - & - & 0 \\
 - & 1 & - & - & 0 & - & - & 0 & - & - & 0 & - \\
 1 & - & - & 0 & - & - & 1 & - & - & 0 & - & -
 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$



#### 6.2.4 Levées de fils :

Les levées de fils indiquent que toutes les chaînes des couches supérieures sont levées pendant l'insertion des trames des couches inférieures. L'identification des levées des fils et leurs placements dans la matrice  $W$  nécessitent de déterminer les couches aux quelles les éléments  $x$  et  $y$  de  $w_{(x,y)}$  appartiennent.

Donc, la première étape est de calculer l'identificateur de chaîne «  $p$  » et l'identificateur de trame «  $q$  » du tissu auquel la chaîne «  $y$  » et la trame «  $x$  » appartiennent.

Premièrement, le calcul de l'identificateur de chaîne «  $p$  » consiste à trouver le paramètre «  $m$  » : où :

$$m = P_{ch1} + P_{ch2} + P_{ch3} \quad (3.16)$$

Puis, l'identificateur de chaîne «  $p$  » peut être trouvé à partir de l'équation suivante :

$$p = [y \text{ MOD } (m)] + (m) \cdot \left[ [y \setminus m] \setminus \left[ \frac{y}{m} \right] \right] \quad (3.17)$$

Deuxièmement, le calcul de l'identificateur de trame «  $q$  » consiste à trouver le paramètre «  $v$  » : où :

$$v = P_{tr1} + P_{tr2} + P_{tr3} \quad (3.18)$$

Puis, l'identificateur de chaîne «  $q$  » peut être trouvé à partir de l'équation suivante :

$$q = [x \text{ MOD } (v)] + (v) \cdot \left[ [x \setminus v] \setminus \left[ \frac{x}{v} \right] \right] \quad (3.19)$$

La deuxième étape est de comparer les valeurs des identificateurs «  $p$  » et «  $q$  » avec les conditions de la définition des couches aux quelles sont soumis, ces conditions se résument comme suivantes:

$$\begin{array}{l}
 1). Si : \quad 0 < q \leq P_{tr1} \quad \Leftrightarrow \quad x \in \text{tissu d'endroit} \quad , \quad n_{(x)} = 1. \\
 2). Si : \quad P_{tr1} < q \leq (P_{tr1} + P_{tr2}) \quad \Leftrightarrow \quad x \in \text{tissu d'intérmidaire} \quad , \quad n_{(x)} = 2 \\
 3). Si : \quad (P_{tr1} + P_{tr2}) < q \leq (P_{tr1} + P_{tr2} + P_{tr3}) \quad \Leftrightarrow \quad x \in \text{tissu d'envers} \quad , \quad n_{(x)} = 3 \\
 4). Si : \quad 0 < p \leq P_{ch1} \quad \Leftrightarrow \quad y \in \text{tissu d'endroit} \quad , \quad n_{(y)} = 1 \\
 5). Si : \quad P_{ch1} < p \leq (P_{ch1} + P_{ch2}) \quad \Leftrightarrow \quad y \in \text{tissu d'intérmidaire} \quad , \quad n_{(y)} = 2 \\
 6). Si : \quad (P_{ch1} + P_{ch2}) < p \leq (P_{ch1} + P_{ch2} + P_{ch3}) \quad \Leftrightarrow \quad y \in \text{tissu d'envers} \quad , \quad n_{(y)} = 3
 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} 1) \\ 2) \\ 3) \\ 4) \\ 5) \\ 6) \end{array}} \right\} (3.20)$$

Pour avoir un tissu multiple sans liage, il exige de ne pas lever la chaîne des couches inférieurs lors d'insertion des duites des couches supérieurs. De ce qui précède, nous pouvons déduire que : si «  $x$  » appartient au tissu supérieur et «  $y$  » appartient au tissu inférieur, alors l'entrecroisement entre ces deux fils qui est représenté par l'élément  $w_{(x,y)}$  égale à :  $w_{(x,y)} = 0$ .

Suivante la définition de la levée de fil, si la trame «  $x$  » appartient au tissu inférieur et si la chaîne «  $y$  » appartient au tissu supérieur, alors l'entrecroisement entre ces deux fils qui est représentés par l'élément  $w_{(x,y)}$  est une levée de fil, et donc  $w_{(x,y)} = 1$ .

Donc, on peut résumer les conditions précédentes comme suivantes:

$$\begin{array}{l}
 si : \quad n_{(x)} < n_{(y)} \Rightarrow w_{(x,y)} = 0, \quad \text{pas de levée de fil} \\
 si : \quad n_{(x)} > n_{(y)} \Rightarrow w_{(x,y)} = 1, \quad \text{levée de fil}
 \end{array} \quad (3.21)$$

Prenant un exemple de l'élément  $w_{(x,y)} = w_{(5,7)}$  de la matrice  $W_{(x,y)}$ , pour savoir si cet élément est une levée de fil ou non, on applique les équations 3.16 à 3.21 :

**Tout d'abord:** pour l'élément  $w_{(x,y)} = w_{(5,7)}$  où :  $x = 5, y = 7$ , et à partir de l'équation (3.16), on calcule le paramètre  $m$ :

$$m = P_{ch1} + P_{ch2} + P_{ch3} = 1 + 1 + 1 = 3$$

Puis, on calcule l'identificateur de chaîne «  $p$  » de l'équation 3.17:

$$p = [y \text{ MOD } (m)] + (m). \left[ [y \setminus m] \setminus \left[ \frac{y}{m} \right] \right] = [7 \text{ MOD } (3)] + (3). \left[ [7 \setminus 3] \setminus \left[ \frac{7}{3} \right] \right] = 1$$

On calcule le paramètre  $v$  de l'équation 3.18:

$$v = P_{tr1} + P_{tr2} + P_{tr3} = 1 + 1 + 1 = 3$$

Puis, on calcule l'identificateur de trame «  $q$  » de l'équation 3.19:

$$q = [x \text{ MOD } (v)] + (v) \cdot \left[ [x \setminus v] \setminus \left\lfloor \frac{x}{v} \right\rfloor \right] = [5 \text{ MOD } (3)] + (3) \cdot \left[ [5 \setminus 3] \setminus \left\lfloor \frac{5}{3} \right\rfloor \right] = 2$$

D'après les conditions (3.20), on trouve que :

$$0 < p \leq P_{ch1} \Rightarrow 0 < (p = 1) \leq 1 \quad \Rightarrow n_{(y)} = 1$$

$$P_{tr1} < q \leq (P_{tr1} + P_{tr2}) \Rightarrow 1 < (q = 2) \leq 2 \quad \Rightarrow n_{(x)} = 2$$

En comparaison avec les conditions d'identification des couches, il peut être remarqué que la chaîne  $y = 7$  appartient au tissu d'endroit, soit :  $n_{(y)} = 1$ , alors que la trame  $x = 5$  appartient au tissu d'intermédiaire, soit :  $n_{(x)} = 2$ . Puis en fonction des conditions de levée des fils (3.21), on constate que  $n_{(x)} > n_{(y)} \Rightarrow$  l'élément  $W_{(5,7)} = 1$ . Donc, la levée du fil est faite dans cette intersection.

La vérification de toutes les levées de fils pour tous les éléments de la matrice en suivant les mêmes procédures précédentes nous donne la matrice suivante :

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Cette matrice  $W$  représente l'armure du tissu triple couches non lié. Le liage des tissus n'est pas encore fait.

### 6.2.5 Génération des points de liage possible :

Pour obtenir un triple tissu auto-lié, les points de liage sont produits entre les couches au moyen de plusieurs modes, soit par liage par ascension «  $\Lambda$  », ou par descension «  $\mathbf{V}$  », ou par ascension et descension «  $\Lambda \mathbf{V}$  ».

Dans tous les cas, un point de liage est l'intersection entre un fil de chaîne «  $y$  » d'une couche avec un fil de trame «  $x$  » d'une autre couche.

Dans ce module mathématique, on abordera le liage par ascension et descension, soit le double liage pour un tissu triple ayant les propositions 1 :1 :1 en chaîne et en trame. Dans ce mode d'assemblage, le tissu intermédiaire s'assemble avec les tissus d'endroit et d'envers par ascension en se levant des chaînes intermédiaires sur la trame d'endroit, et par descension en se baissant des chaînes intermédiaires sous la trame de l'envers.

En général, en cas d'un point d'ascension, l'élément  $W_{(x,y)}$  prend la valeur « 1 » dans la matrice «  $\mathbf{W}$  », alors qu'en cas d'un point de descension, l'élément  $W_{(x,y)}$  prend la valeur « 0 » dans la matrice «  $\mathbf{W}$  ».

Dans la matrice  $W$ , considérant que  $y$  est un fil de liage appartenant à la couche intermédiaire, il doit être lié à la couche «  $n^{th}$  » (la couche d'endroit ou d'envers) en passant au-dessus ou au-dessous d'une trame «  $x$  » .

Selon l'hypothèse que le point de liage doit être effectué à l'intersection correspondante à l'élément  $W_{(x,y)}$ , ce point doit donc se trouver entre deux éléments adjacents  $W_{(x,y1)}$  ou  $W_{(x,y2)}$ , de la même couche «  $n$  » à laquelle appartient la trame «  $x$  », c'est-à-dire que :  $n_{(x)} = n_{(y1)} = n_{(y2)}$ . Sachant que les points de liage peuvent être visibles ou invisibles, on peut résumer toutes les conditions citées précédemment comme suit:

$$\left. \begin{array}{l} \text{si : } n_{(y)} = 2, n_{(x)} = 1, n_{(y-1)} = 1 \text{ et } W_{(x,y-1)} = 1 \Rightarrow W_{(x,y)} = 1, \Leftrightarrow \text{point d'ascension} \\ \text{si : } n_{(y)} = 2, n_{(x)} = 3, n_{(y+1)} = 3 \text{ et } W_{(x,y+1)} = 1 \Rightarrow W_{(x,y)} = 0, \Leftrightarrow \text{point de descension} \end{array} \right\} \quad (3.23)$$

Donc, pour vérifier un point de liage, on doit identifier les couches  $n$  auxquelles les chaînes  $y$  et les trames  $x$  appartiennent. Ces identifications est fait par les équations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} n_{(y)} &= y - (3) \cdot [(y - 1) \setminus 3] \\ n_{(x)} &= x - (3) \cdot [(x - 1) \setminus 3] \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

Pour vérifier les équations précédentes, on prend l'élément  $W_{(5,7)}$  de la matrice (3.22):

Pour  $x = 5$  et  $y = 7$ , à partir de l'équation (3.24), on trouve :

$$\begin{aligned} n_{(y)} &= 7 - (3) \cdot [(7 - 1) \setminus 3] = 1 \\ n_{(x)} &= 5 - (3) \cdot [(5 - 1) \setminus 3] = 2 \end{aligned}$$

Selon les conditions des points de liage (3.23), on trouve que l'élément  $W_{(5,7)}$  ne représente pas un point de liage, donc la valeur de cet élément ne change pas dans la matrice.

On prend un deuxième exemple, c'est l'élément  $W_{(4,5)}$ . En appliquant l'équation (3.24), on trouve que  $n_{(y)} = 2$  et  $n_{(x)} = 1$ , donc selon les conditions (3.23) on trouve que cet élément  $W_{(7,5)}$  peut être un point de liage. Alors dans ce cas, on doit calculer  $n_{(y-1)}$  de l'équation (3.24) en mettant  $y = 5 - 1 = 4$ :

$$n_{(y-1)} = 4 - (3) \cdot [(4 - 1) \setminus 3] = 1$$

De la matrice  $W$ , on trouve que la valeur  $W_{(x,y-1)} = W_{(4,4)} = 1$ , donc l'élément  $W_{(x,y)} = W_{(4,5)}$  représente un point de liage (ascension) et la valeur de cet élément va changer dans la matrice de :  $W_{(4,5)} = 0$  à  $W_{(4,5)} = 1$ .

On termine cette vérification par un troisième exemple, prenant l'élément  $W_{(6,8)}$ , de la même manière on trouve que :

$$n_{(y)} = 2, n_{(x)} = 3, y + 1 = 9, n_{(y+1)} = 3, W_{(x,y+1)} = W_{(6,9)} = 0.$$

Donc l'élément  $W_{(x,y)} = W_{(6,8)}$  représente un point de liage (descension) et la valeur de cet élément va changer dans la matrice de  $W_{(6,8)} = 1$  à  $W_{(4,5)} = 0$ .

De la même manière, on vérifie tous les éléments de la matrice  $W$ , on trouve que les éléments suivants représentent les points de liage (descension) :

$$W_{(6,2)} = W_{(6,8)} = W_{(12,2)} = W_{(12,8)} = W_{(3,5)} = W_{(3,11)} = W_{(9,5)} = W_{(9,11)} = 0$$

et les éléments suivants représentent les points de liage (ascension) :

$$W_{(1,2)} = W_{(4,5)} = W_{(7,8)} = W_{(10,11)} = 1$$

La matrice suivante représente la matrice définitive de l'armure du tissu triple couches avec liage maximal.

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Un autre module mathématique a été développé dans notre recherche pour générer automatiquement les armures de liage selon la densité de liage désiré. Ce module sera abordé prochainement au paragraphe 7.

### 6.2.6 Description du module programmatique :

Le module mathématique développé a été vérifié par un logiciel programmé par VB6. Dans ce logiciel, la première étape consiste à définir tous les paramètres du tissu triple (tissu d'endroit, intermédiaire, et d'envers). Ces paramètres sont : proportions des chaînes, proportions des trame, les rapports de chaînes et de trames, les armures, ...etc. (Cf. paragraphe 7.5).

### **6.2.7 Conclusion :**

Un tissu triple couche est un type de structure tissée composé de trois couches superposées, assemblées entre elles par des moyens différents tels que l'auto liage, le double liage,..... etc.

Le triple tissu auto-lié par des ascensions et descensions a été décrit mathématiquement et puis automatiquement généré par le développement du module mathématique programmable. Dans ce logiciel, après l'identification de ce tissu, l'armure définitive sera créée, montrant tous les points de liage possibles. Un autre module mathématique a été intégré dans ce logiciel pour sélectionner les points de liage requis selon la densité désirée de ces points pour générer automatiquement l'armure définitive. Celle-ci pourra ainsi être transférée à la machine à tisser. Ce module intégré sera décrit par la suite au paragraphe 7.

## 7. Auto-génération des armures de liage pour un tissu triple lié par la chaîne de la couche intermédiaire :

### 7.1. Définitions :

Soit  $A_{(R_{tr},R_{ch})}$  une matrice binaire dont les éléments sont 0 et 1, représentant une armure définitive d'un tissu multiple, contenant tous les points de liage disponibles. Le tissu composé de  $n$  couches auto-liées entre elles. Toutes les chaînes et les trames ont un titre identique. On définit les éléments de la matrice  $A_{(R_{tr},R_{ch})} = (a_{x,y})_{\substack{1 \leq x \leq R_{tr} \\ 1 \leq y \leq R_{ch}}}$ .

$$A_{(R_{tr},R_{ch})} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,y} & \cdots & a_{1,R_{ch}} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,y} & \cdots & a_{2,R_{ch}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{x,1} & a_{x,2} & \cdots & a_{x,y} & \cdots & a_{x,R_{ch}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{R_{tr},1} & a_{R_{tr},2} & \cdots & a_{R_{tr},y} & \cdots & a_{R_{tr},R_{ch}} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$R_{tr}$  et  $R_{ch}$  : est le rapport en trame et le rapport en chaîne du tissu complexe.

À partir de cette matrice, et suivant des conditions spécifiques dépendant du tissu, on doit construire une autre matrice  $L_{(R_{tr},R_{ch})}$  appelé la matrice primaire du liage maximal, dont les éléments  $l_{(i,j)}$  sont tous les points de liage disponibles dans l'armure définitive  $A_{(R_{tr},R_{ch})}$ .

$$L_{(R_{tr},R_{ch})} = \begin{pmatrix} l_{1,1} & l_{1,2} & \cdots & l_{1,j} & \cdots & l_{1,R_{ch}} \\ l_{2,1} & l_{2,2} & \cdots & l_{2,j} & \cdots & l_{2,R_{ch}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{i,1} & l_{i,2} & \cdots & l_{i,j} & \cdots & l_{i,R_{ch}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{R_{tr},1} & l_{R_{tr},2} & \cdots & l_{R_{tr},j} & \cdots & l_{R_{tr},R_{ch}} \end{pmatrix} \quad \text{où : } \begin{matrix} 1 \leq i \leq R_{tr} \\ 1 \leq j \leq R_{ch} \end{matrix} \quad (4.2)$$

Les valeurs des éléments  $l_{(i,j)}$  de cette matrice dépendent de la complexité de la structure du tissu, soit du nombre de couches  $n$  et du type de liage.

En d'autres termes, en cas de liage par les chaînes des couches supérieures, les éléments  $l_{(i,j)} = 0$  et  $-1$  ; en cas de liage par les chaînes des couches inférieures, les éléments  $l_{(i,j)} = 0$  et  $1$  ; en cas de liage par les chaînes de la couche intermédiaire,  $l_{(i,j)} = 0, 1$  et  $-1$ .



Pour remplir la matrice de liage maximal  $L_{(R_{tr}, R_{ch})}$  à partir de la matrice d'armure  $A_{(R_{tr}, R_{ch})}$ , on suivra la procédure suivante :

$$l_{(i,j)} = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \left\{ \begin{array}{l} \text{si } n_{(x)} < n_{(y)} \text{ et } a_{i,j} = 0 \\ \text{si } n_{(x)} = n_{(y)} \end{array} \right. \\ 1 & \text{si } n_{(x)} < n_{(y)} \text{ et } a_{i,j} = 1 \quad \text{Point de liage (ascension)} \\ -1 & \text{si } n_{(x)} > n_{(y)} \text{ et } a_{i,j} = 0 \quad \text{Point de liage (descension)} \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

Ensuite, la matrice  $L_{(R_{tr}, R_{ch})}$  sera réduite s'il y a des lignes ou des colonnes nulles à une matrice réduite  $LR_{(I,J)}$ .

De la matrice  $LR_{(I,J)}$ , on doit construire une matrice de liage définitive  $P$  correspondant au taux de liage donné  $T_{liage}$ . Le taux de liage maximal peut être défini comme suit :

$$T_{liage}^{max} \% = \frac{100 \cdot M}{R_{tr}} \quad (4.4)$$

$M$  est le nombre minimal d'éléments non nuls existants dans chaque colonne de la matrice  $LR_{(I,J)}$ . Autrement dit, c'est le plus petit nombre de points de liage disponibles dans chaque chaîne dans le rapport du tissu. Ce paramètre nous donne une valeur initiale du nombre de taux de liage possible dans le tissu.

$$M = \text{Min}(N_{(j)})_{1 \leq j \leq J} = \text{Min}(N_{(j=1)}, N_{(j=2)}, N_{(j=3)}, \dots, N_{(j=J)}) \quad (4.5)$$

$N_{(j)}$  le nombre de points de liage disponibles dans la chaîne  $j$  peut être calculé au moyen de l'équation suivante :

$$N_{(j)} = \sum_{i=1}^J |l_{(i,j)}| \quad (4.6)$$

Tandis que le taux de liage désiré est défini comme suit :

$$T_{liage} \% = \frac{100 \cdot m}{R_{tr}} \quad \text{où : } 1 \leq m \leq M \quad (4.7)$$

## 7.2. Génération de la combinaison des points de liage :

Fondé sur la définition de la combinaison mathématique, considérant que  $N_{(j)}$  est un ensemble fini des points de liage disponibles dans la chaîne  $j$  et que  $m$  est un sous-ensemble qui représente le nombre des points de liage permettant de réaliser le taux de liage désiré.

Le nombre des possibilités de liage dans la chaîne  $j$  peuvent être calculé à partir de l'équation suivante :

$$C_{N_{(j)}}^m = \binom{N_{(j)}}{m} = \frac{N_{(j)}!}{m!(N_{(j)} - m)!} = \left( \prod_{g=N_{(j)}-m+1}^{N_{(j)}} g \right) / m! \quad (4.8)$$

Où  $m$  est calculé à partir de l'équation (4.5) pour un taux de liage donné.

Le paramètre  $z$  définit le nombre des matrices de liage  $P_{(I,j)}$  produites de la matrice de liage réduite, où ;

$$1 \leq z \leq \prod_{j=1}^J C_{N_{(j)}}^m \quad (4.9)$$

Pour un  $z$  donné, on va générer mathématiquement une matrices  $P_{(I,j)}$  .

Le paramètre  $H_{(j)}$  , où ;  $0 < H_{(j)} \leq C_{N_{(j)}}^m$  , doit être calculé à partir des équations suivantes :

- si  $j = 1 \Rightarrow$

$$H_{(j)} = \beta(j) + \left[ Z \setminus \left[ \prod_{y=j+1}^J [C_{N_{(y)}}^m] \right] \right] , \quad \text{où:} \quad \begin{cases} \beta(j) = \begin{cases} 0, & \text{if } u = 0 \\ 1, & \text{if } u \neq 0 \end{cases} \\ u = Z \text{ MOD } \left[ \prod_{y=j+1}^J [C_{N_{(y)}}^m] \right] \end{cases} \quad (4.10)$$

- si  $2 \leq j \leq J - 1 \Rightarrow$

$$\left. \begin{aligned}
 H_{(j)} &= \beta_{(j)} + Z - \left\{ \left[ \sum_{f=1}^{j-1} \left( [H_{(f)} - 1] \cdot \left[ \prod_{g=f+1}^J (C_{N_{(g)}}^m) \right] \right) \right] \setminus \left[ \prod_{y=j+1}^J (C_{N_{(y)}}^m) \right] \right\} \\
 \text{Où: } \beta_{(j)} &= \begin{cases} 0, & \text{if } u = 0 \\ 1, & \text{if } u \neq 0 \end{cases} \\
 u &= Z - \left\{ \left[ \sum_{f=1}^{j-1} \left( [H_{(f)} - 1] \cdot \left[ \prod_{g=f+1}^J (C_{N_{(g)}}^m) \right] \right) \right] \text{MOD} \left[ \prod_{y=j+1}^J (C_{N_{(y)}}^m) \right] \right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

- **si  $j = J \Rightarrow$**

$$H_{(j)} = Z \text{MOD} \sum_{f=1}^{j-1} \left( [H_{(f)} - 1] \cdot \left[ \prod_{g=f+1}^J (C_{N_{(g)}}^m) \right] \right) \quad (4.12)$$

Pour chaque  $H_{(j)}$  calculé, la combinaison des points de liage  $B_{(H_{(j)})}$  doit être recherché. Premièrement, on trouve le premier nombre qui réalise l'inégalité suivante :

$$X \geq H_{(j)} \quad (4.13)$$

Puis, la combinaison  $B_{(H_{(j)})} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_k, \dots, b_{m-1}, b_m)$  se calcule selon le paramètre  $m$  à partir des équations suivantes:

- **Si  $m = 1$  :**

Ici on n'applique pas l'équation 4.13 car la combinaison  $B_{(H_{(j)})}$  est composée d'un élément unique  $H_{(j)}$ , donc:

$$B_{(H_{(j)})} = H_{(j)} \quad (4.14)$$

- **Si  $m = 2$  :**

$$X = \sum_{f=N_{(j)}-1}^d f \quad \text{pour : } d = N_{(j)} - 1 \quad \text{to } 1 \quad (4.15)$$

$$B_{(H_{(j)})} = (b_1, b_2) \quad \text{où ; } \begin{cases} b_1 = N_{(j)} - d \\ b_2 = N_{(j)} - X + H_{(j)} \end{cases} \quad (4.16)$$

- Si  $m > 2$  :

$$\left. \begin{aligned}
 X &= \sum_{f_1=1}^{d_1} \sum_{f_2=1}^{d_2} \sum_{f_3=1}^{d_3} \dots \dots \sum_{f_k=1}^{d_k} \sum_{f_{m-1}=N_{(j)}-1-\sum_{i=1}^{m-2} f_i}^{d_{m-1}} f_{m-1} \\
 \text{pour } : d_k &= 1 \text{ à } N_{(j)} - m + k - \sum_{i=1}^{k-1} f_i, \quad \text{pour } : k = 1, 2, 3, \dots, m-2 \\
 \text{pour } : d_{m-1} &= N_{(j)} - 1 - \sum_{i=1}^{m-2} f_i \quad \text{à } 1
 \end{aligned} \right\} (4.1)$$

Puis, on détermine la combinaison  $B_{(H_{(j)})}$  suivante :

$$\left. \begin{aligned}
 B_{(H_{(j)})} &= (b_1, b_2, b_3, \dots, b_k, \dots, b_{m-1}, b_m) \\
 b_k &= \begin{cases} d_k + d_{k-1} & \text{pour: } k = 1, 2, 3, \dots, m-2 \\ N_{(j)} - d_{m-1} & \text{pour: } k = m-1 \\ N_{(j)} - X + H_{(j)} & \text{pour: } k = m \end{cases}
 \end{aligned} \right\} (4.18)$$

### 7.3. Génération de la matrice de liage $P_{(I,J)}$ :

Après trouver la combinaison  $B_{(H_{(j)})}$  correspondant à la colonne  $j$ , on cherche la matrice de colonne  $P_{(t,j)}$  correspondant à la combinaison  $B_{(H_{(j)})}$ , dont les éléments sont  $p_{(t,j)}$ .

$$P_{(t,j)} = \begin{bmatrix} p_{(1,j)} \\ p_{(2,j)} \\ \vdots \\ \vdots \\ p_{(t,j)} \\ \vdots \\ p_{(l,j)} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Pour ce faire, on doit déterminer la position de chaque élément  $b_k$  comme un élément  $p_{i,j}$  dans la matrice  $P_{(t,j)}^H$ , puis on calcule la valeur de ces éléments  $p_{(t,j)}$  en se fondant sur les éléments de la matrice de liage réduite  $LR_{(I,J)}$  et des éléments de la combinaison  $B_{(H_{(j)})}$  comme suit :

$$p_{(t,j)}^H = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{si } \sum_{i=1}^t |l_{i,j}| \neq b_{k,j} \\ l_{t,j} & \text{si } \sum_{i=1}^t |l_{i,j}| = b_{k,j} \end{array} \right. \quad \text{puis: } k \text{ et } t \text{ suivant} \quad (4.20)$$

$$\text{pour : } \left\{ \begin{array}{l} k = 1, 2, \dots, m \\ t = 1, 2, \dots, I \end{array} \right.$$

Après avoir trouvé tous les éléments  $p_{(t,j)}$  correspondants au paramètre  $H_{(j)}$  de la colonne  $j$ , on obtient la première colonne de la matrice  $P_{(t,j)}$ .

On répète les mêmes procédures du début pour  $j = 1$  à  $j = J$ , puis on construit la matrice de liage  $P_{(1,j)}$  correspondante à la variante  $z$  donnée par l'équation (4.9).

La dernière étape est de vérifier si cette disposition des points de liage (la matrice  $P_{(t,j)}$ ) est réalisable ou non. Comme il est bien connu que tous les fils de liage doivent avoir un embuvage identique (si ces fils sont enroulés sur une seule ensouple), cette contrainte peut être exprimée par les deux formules suivantes :

- le nombre de flotté de liage  $N_{(j)}^f$  dans chaque colonne  $j$ , ce paramètre peut être calculé comme suit :

$$N_{(j)}^f = [(|p_{(1,j)}| - |p_{(I,j)}| + 1) \setminus 2] + \sum_{i=1}^{I-1} [(|p_{(i+1,j)}| - |p_{(i,j)}| + 1) \setminus 2] \quad (4.21)$$

Où :  $(1 \leq N_{(j)}^f \leq m)$

- Nombre de fois que le fil de liage change de position entre les couches  $\Delta L_{(j)}^{f(k)}$  pour chaque flotté "k" où :  $(1 \leq k \leq N_{(j)}^f)$ .

Ce changement peut être calculé à partir de la matrice  $P_{(t,j)}^H$  comme suit :

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } p_{(i,j)} + p_{(i+1,j)} = 0 \\ \text{et} \\ \text{si } p_{(i,j)} \neq 0 \text{ et } p_{(i+1,j)} \neq 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{changement de niveau remarqué} \quad (4.22)$$

quand  $i = I$  on prend  $i + 1 = 1$

Donc, pour que cette matrice de liage soit valide, le paramètre  $N_{(j)}^f$  doit être identique pour toutes les colonnes de la matrice de liage  $P_{(I,J)}$ , ainsi que le paramètre  $\Delta L_{(j)}$ . On peut formuler ces conditions comme suit :

$$\left. \begin{array}{l} 1. \quad N_{(j)}^f = N_{(b)}^f \\ 2. \quad \sum_{k=1}^{N_{(j)}^f} \Delta L_{(j)}^{f(k)} = \sum_{k=1}^{N_{(b)}^f} \Delta L_{(b)}^{f(k)} \end{array} \right) \quad \text{for } \begin{cases} b = 1, 2, \dots, R_{ch} \\ j = 1, 2, \dots, R_{ch} \\ b \neq j \end{cases} \quad (4.23)$$

Si ces deux conditions sont réalisées, la matrice de liage  $P_{(I,J)}$  correspondant à la variante z sera générée comme suit:

$$P_{(I,J)} = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,j} & \cdots & p_{1,J} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,j} & \cdots & p_{2,J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{i,1} & p_{i,2} & \cdots & p_{i,j} & \cdots & p_{i,J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{I,1} & p_{I,2} & \cdots & p_{I,j} & \cdots & p_{I,J} \end{pmatrix} \quad \text{où : } \begin{cases} 1 \leq i \leq I \\ 1 \leq j \leq J \end{cases} \quad (4.24)$$

Enfin, après avoir généré toutes les matrices de liage correspondant à toutes les valeurs de la variante z, on compare toutes les matrices de liage valides pour rejeter les matrices identiques. Cette comparaison peut être réalisée par l'application des théories des symétries et rotations, permutation circulaire en chaîne et en trame, symétries en chaîne et en trame, rotation simple et multiple [42].

### 7.4. Exemples de démonstration:

Prenant le tissu illustré figure 4.1 comme un exemple de démonstration pour expliquer la modalité d'application du module mathématique précédemment développé sur un tissu triple couches liées par les chaînes intermédiaires.

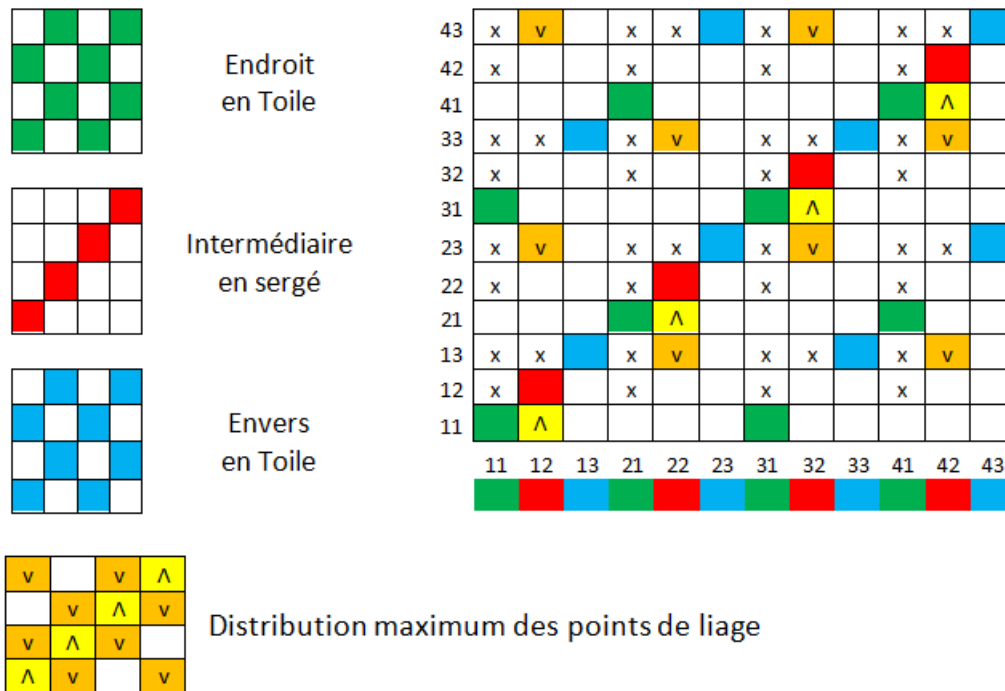


Figure 4. 1 : Armure du tissu triple couche, avec tous les points de liage possibles

Tout d'abord, on transfère l'armure définitive en matrice binaire  $A_{(R_{tr},R_{ch})}$ , où  $R_{tr} = 12$  et  $R_{ch} = 12$  comme montré dans la matrice 4.25.

$$A_{(R_{tr},R_{ch})} = A_{(12,12)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

Puis, on construit la matrice primaire du liage maximal  $L_{(R_{tr},R_{ch})}$ , prenant en considération que les descensions sont représenté par -1 et les ascensions par 1 dans la matrice de liage  $L$ .

$$L_{(R_{tr},R_{ch})} = L_{(12,12)} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

L'exclusion des lignes et des colonnes nulles de la matrice primaire  $L_{(R_{tr},R_{ch})}$  nous donne la matrice réduite de liage  $LR_{(I,J)}$ , où :  $I = 8$  et  $J = 4$ .

$$LR_{(I,J)} = LR_{(8,4)} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

On calcule le nombre des points de liage disponibles dans chaque colonne à partir de l'équation (4.6) :

$$N_{(j)} = \sum_{i=1}^{j=4} |l_{(i,j)}| \Rightarrow N_{(j=1)} = N_{(j=2)} = N_{(j=3)} = N_{(j=4)} = 3 \quad (4.28)$$

Le paramètre  $M$  se calcule à partir de l'équation (4.5) :

$$M = \text{Min}(N_{(j)})_{1 \leq j \leq 4} = 3 \quad (4.29)$$

Donc, on peut déduire qu'il sera possible de tisser cette armure avec 3 taux de liage différents. Le calcul du taux de liage se fait en utilisant l'équation (4.7) :



$$\begin{aligned}
 \text{Quand } m = 1, \quad T_{\text{liage}} \% &= \frac{100 \cdot m}{R_{tr}} = \frac{100 \cdot 1}{12} = 8.33 \% \\
 \text{Quand } m = 2, \quad T_{\text{liage}} \% &= \frac{100 \cdot m}{R_{tr}} = \frac{100 \cdot 2}{12} = 16.66 \% \\
 \text{Quand } m = 3, \quad T_{\text{liage}} \% &= \frac{100 \cdot m}{R_{tr}} = \frac{100 \cdot 3}{12} = 25 \%
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Dans cet exemple, on va prendre un taux de liage de 16.6 % où ; m=2. Il est intéressant de mentionner ici que les étapes suivantes du calcul seront appliquées à chaque colonne de la matrice réduite. Donc, on va prendre la colonne j=3 comme exemple.

On calcule le nombre de possibilités de liage dans la chaîne  $j = 3$  à partir de l'équation (4.8) :

$$\begin{aligned}
 C_{N(j)}^m &= \binom{N(j)}{m} = \frac{N(j)!}{m!(N(j)-m)!} = \left( \prod_{g=N(j)-m+1}^{N(j)} g \right) / m! \\
 C_3^2 &= \binom{3}{2} = \frac{3!}{2!(3-2)!} = 3
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

Donc, selon l'arrangement des points, il y aura 3 possibilités de liage.

Puis, on calcule les limites du paramètre z ;

$$\prod_{j=1}^{j=4} C_{N(j)}^m = C_{N(1)}^2 \cdot C_{N(2)}^2 \cdot C_{N(3)}^2 \cdot C_{N(4)}^2 = (C_3^2)^4 = 81 \tag{4.32}$$

Donc la variante z est limitée entre 1 et 81.

### 7.4.1 Exemple de démonstration 1:

Pour  $z = 15$ , la génération de la matrice  $P_{(I,j)}$  se fait à partir de l'équation (4.10), sachant que la variante z est prise entre 1 et 81. On calcule H(j) pour  $1 \leq j \leq 4$  comme suit:

$$\begin{aligned} \text{Pour } j = 1 \Rightarrow u &= Z \text{ MOD } \prod_{y=j+1}^4 C_{N(y)}^m = 15 \text{ MOD } \prod_{y=2}^4 C_{N(y)}^2 \\ &= 15 \text{ MOD } (3 \times 3 \times 3) = 15 \text{ MOD } 27 = 27 \neq 0 \text{ then } \beta(j = 1) = 1 \end{aligned}$$

$$H_{(j=1)} = \beta(j) + \left[ Z \setminus \prod_{y=j+1}^5 C_{N(y)}^{2max} \right] = 1 + [15 \setminus 27] = 1 + 0 = 1$$

$$\begin{aligned} \text{pour } j = 2 \Rightarrow u &= \left[ z - \left[ \sum_{f=1}^1 \left[ [H_{(f)} - 1] \cdot \prod_{g=f+1}^4 C_{N(g)}^2 \right] \right] \text{ MOD } \prod_{y=3}^4 C_{N(y)}^2 \right] \\ &= \left( 15 - \left[ [H_{(1)} - 1] \cdot \prod_{g=2}^4 C_{N(g)}^2 \right] \right) \text{ MOD } \prod_{y=3}^4 C_{N(y)}^2 \\ &= 15 \text{ MOD } 9 = 6 \neq 0 \text{ then } \beta(j = 2) = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{(j=2)} &= 1 + \left\{ 15 - \left[ \sum_{f=1}^1 \left( [H_{(1)} - 1] \cdot \left[ \prod_{g=f+1}^4 (C_{N(g)}^2) \right] \right) \right] \setminus \left[ \prod_{y=3}^4 (C_{N(y)}^2) \right] \right\} = 1 + \{15 \setminus 9\} \\ &= 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pour } j = 3 \Rightarrow u &= \left[ z - \left[ \sum_{f=1}^2 \left[ [H_{(f)} - 1] \cdot \prod_{g=f+1}^4 C_{N(g)}^2 \right] \right] \text{ MOD } \prod_{y=4}^4 C_{N(y)}^2 \right] \\ &= \left( 15 - \left[ [H_{(1)} - 1] \cdot \prod_{g=2}^4 C_{N(g)}^2 + [H_{(2)} - 1] \cdot \prod_{g=3}^4 C_{N(g)}^2 \right] \right) \text{ MOD } \prod_{y=4}^4 C_{N(y)}^2 \\ &= (15 - [0 + [1] \cdot (9)]) \text{ MOD } (3) = 6 \text{ mod } 3 = 0 \text{ then } \beta(j = 3) = 0 \end{aligned}$$

$$H_{(j=3)} = 0 + \left[ Z - \left[ \sum_{f=1}^2 \left[ [H_{(f)} - 1] \cdot \prod_{g=f+1}^4 C_{N(g)}^2 \right] \right] \setminus \prod_{y=4}^4 C_{N(y)}^2 \right] = [6 \setminus 3] = 2$$

Pour  $j = 4 \Rightarrow$

$$\begin{aligned}
 H_{(j=4)} &= Z \text{ Mod } \left( \sum_{f=1}^3 [H_{(f)} - 1] \cdot \prod_{g=f+1}^4 C_{N_{(g)}}^2 \right) \\
 &= (15) \text{ Mod } \left[ \left( [H_{(1)} - 1] \cdot \prod_{g=2}^4 C_{N_{(2)}}^2 \right) + \left( [H_{(2)} - 1] \cdot \prod_{g=3}^4 C_{N_{(3)}}^2 \right) + \left( [H_{(3)} - 1] \cdot \prod_{g=4}^4 C_{N_{(4)}}^2 \right) \right] \\
 &= (15) \text{ Mod } (0 + 9 + 3) = 15 \text{ Mod } 12 = 3
 \end{aligned}$$

Donc,  $H_{(j=1)} = 1$ ,  $H_{(j=2)} = 2$ ,  $H_{(j=3)} = 2$ ,  $H_{(j=4)} = 3$

Pour vérifier les derniers résultats, on applique l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 Z &= H_{(j=j)} + \left( \sum_{j=1}^{J-1} [H_{(j)} - 1] \cdot \prod_{y=j+1}^{J-1} C_{N_{(y)}}^m \right) = H_{(j=4)} + \left( \sum_{j=1}^3 ([H_{(j)} - 1] \cdot \prod_{y=j+1}^3 C_{N_{(y)}}^2) \right) \\
 &= H_{(j=4)} + [H_{(1)} - 1] \cdot (C_{N_{(2)}}^2 \cdot C_{N_{(3)}}^2 \cdot C_{N_{(4)}}^2) + [H_{(2)} - 1] \cdot (C_{N_{(3)}}^2 \cdot C_{N_{(4)}}^2) + [H_{(3)} - 1] \cdot (C_{N_{(4)}}^2) \\
 &= 3 + 0 + 9 + 3 = 15
 \end{aligned}$$

Puis, on calcule les combinaisons des points de liage  $B_{(H_{(j)})}$  selon H

Pour  $j=1$ , on a  $H_{(j=1)} = 1$ ,  $N_{(j=1)} = 3$ ,  $m = 2$ , donc on cherche le premier nombre qui réalise l'inégalité suivante:  $x \geq (H_{(j=1)} = 1)$  - équation (4.13) - pour trouver la combinaison  $B_{(H_{(j)})}$ .

Pour  $m = 2$ , de l'équation (4.15) :

$$X = \sum_{f=N_{(j)}-1}^d f \quad \text{pour : } d = N_{(j)} - 1 \text{ to } 1$$

Pour;  $j = 1$  on a :  $d = 2$  to 1

$$X = \sum_{f=2}^d f = \sum_{f=2}^2 f = 2 \Leftrightarrow X = (H_{(j=1)}) = 2$$

On trouve que l'inégalité est réalisée quand  $d=2$ . Donc, à partir de l'équation (4.16), on détermine la combinaison  $B_{(H_{(j)})}$  correspondante :

$$B_{(H_{(j=1)})} = (b_1, b_2) \quad \text{où ; } \begin{cases} b_1 = N_{(j)} - d & = 3 - 2 = 1 \\ b_2 = N_{(j)} - X + H_{(j)} & = 3 - 2 + 1 = 2 \end{cases} \Rightarrow B_{(H_{(j=1)})} = (1, 2)$$

De la même manière, on trouve les autres combinaisons pour j=2, 3, 4 :

$$B_{(H_{(j=1)})} = (1, 2), \quad B_{(H_{(j=2)})} = (1, 3), \quad B_{(H_{(j=3)})} = (1, 3), \quad B_{(H_{(j=4)})} = (2, 3)$$

Maintenant, on recherche la matrice de colonne  $P_{(t,j)}$  dont les éléments sont  $p_{(t,j)}$  pour chaque combinaison  $B_{(H_{(j)})}$  en se fondant sur la colonne j de la matrice réduite  $LR_{(I,J)}$  correspondante.

Par exemple, on prend la colonne j=1 de la matrice réduite donnée par l'équation (4.27), ci après :

$$LR_{(I,J)} = LR_{(8,4)} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

$$LR_{(j=1)} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

La colonne j=1 de la matrice de liage  $P_{(I,J)}$  est la suivante:

$$P_{(I,1)} = \begin{bmatrix} p_{(1,1)} \\ p_{(2,1)} \\ \vdots \\ \vdots \\ p_{(t,1)} \\ \vdots \\ p_{(1,1)} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

En appliquant la formule donnée par l'équation (4.20), on trouve :

$$p_{t,1} = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{si } \sum_{i=1}^t |l_{i,1}| \neq b_{k,1} \\ l_{t,1} & \text{si } \sum_{i=1}^t |l_{i,1}| = b_{k,1} \end{array} \right. \text{ then next } k \text{ and } t \left. \right\}, \text{ où : } \left\{ \begin{array}{l} k = \text{de } 1 \text{ à } 2 \\ t = \text{de } 1 \text{ à } 8 \end{array} \right\}$$

Donc, on obtient la première colonne de la matrice de liage  $P_{(t,j)}$

$$P_{(j=1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

De la même manière, on trouve les autres colonnes, et enfin on obtiendra la matrice de liage correspondant à la variante z=15.

$$P_{(I,J)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Pour vérifier si cette disposition des points de liage est réalisable, tous les fils de liage doivent avoir un embuvage identique. En appliquant l'équation 4.21, on calcule le nombre de flotté  $N_{(j)}^f$  pour chaque colonne:

Prenant j=3 par exemple, on trouve:

$$N_{(j)}^f = [(|p_{(1,j)}| - |p_{(I,j)}| + 1) \setminus 2] + \sum_{i=1}^{I-1} [(|p_{(i+1,j)}| - |p_{(i,j)}| + 1) \setminus 2]$$

$$\begin{aligned}
 N_{(j=3)}^f &= [(|p_{(1,3)}| - |p_{(8,3)}| + 1) \setminus 2] + \sum_{i=1}^7 [(|p_{(i+1,j)}| - |p_{(i,j)}| + 1) \setminus 2] \\
 &= [(|p_{(1,3)}| - |p_{(8,3)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(2,3)}| - |p_{(1,3)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(3,3)}| - |p_{(2,3)}| + 1) \setminus 2] + \\
 &\quad [(|p_{(4,3)}| - |p_{(3,3)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(5,3)}| - |p_{(4,3)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(6,3)}| - |p_{(5,3)}| + 1) \setminus 2] + \\
 &\quad [(|p_{(6,3)}| - |p_{(5,3)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(7,3)}| - |p_{(6,3)}| + 1) \setminus 2] \\
 &= [(|0| - |-1| + 1) \setminus 2] + [(-1| - |0| + 1) \setminus 2] + [(|0| - |-1| + 1) \setminus 2] + [(|0| - |0| + 1) \setminus 2] \\
 &\quad + [(|0| - |0| + 1) \setminus 2] + [(-1| - |0| + 1) \setminus 2] + [(|0| - |0| + 1) \setminus 2] + [(|0| - |0| + 1) \setminus 2] \\
 &= [0 \setminus 2] + [2 \setminus 2] + [0 \setminus 2] + [1 \setminus 2] + [1 \setminus 2] + [2 \setminus 2] + [1 \setminus 2] + [0 \setminus 2] = 2
 \end{aligned}$$

De la même manière, on trouve ;  $N_{(j=1)}^f = N_{(j=2)}^f = N_{(j=3)}^f = 2$  et  $N_{(j=4)}^f = 1$

En se référant à l'équation 4.23, on trouve que la première condition n'est pas réalisée et par conséquent la matrice de liage correspondant à la variante  $z=15$  n'est pas valide, donc il faudra prendre la  $z$  suivante.

#### 7.4.2 Exemple de démonstration 2:

Pour  $z = 16$ , la génération de la matrice  $P_{(1,1)}$  se fait à partir de l'équation (4.10).

On calcule  $H_{(j)}$  pour  $1 \leq j \leq 4$  :

$$\begin{aligned}
 \text{Pour } j = 1 \Rightarrow u &= Z \text{ MOD } \prod_{y=j+1}^4 C_{N(y)}^m = 16 \text{ MOD } \prod_{y=2}^4 C_{N(y)}^2 \\
 &= 16 \text{ MOD } (3 \times 3 \times 3) = 16 \text{ MOD } 27 = 27 \neq 0 \text{ then } \beta(j = 1) = 1 \\
 H_{(j=1)} &= \beta(j) + \left[ Z \setminus \prod_{y=j+1}^4 C_{N(y)}^{2max} \right] = 1 + [16 \setminus 27] = 1 + 0 = 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{pour } j = 2 \Rightarrow u &= \left[ z - \left[ \sum_{f=1}^1 \left[ [H_{(f)} - 1] \cdot \prod_{g=f+1}^4 C_{N_{(g)}}^2 \right] \right] \right] \text{MOD} \prod_{y=3}^4 C_{N_{(y)}}^2 \\
 &= \left( 16 - \left[ [H_{(1)} - 1] \cdot \prod_{g=2}^4 C_{N_{(g)}}^2 \right] \right) \text{MOD} \prod_{y=3}^4 C_{N_{(y)}}^2 \\
 &= 16 \text{ MOD } 9 = 7 \neq 0 \text{ then } \beta(j = 2) = 1
 \end{aligned}$$

$$H_{(j=2)} = 1 + \left\{ 16 - \left[ \sum_{f=1}^1 \left( [H_{(1)} - 1] \cdot \left[ \prod_{g=f+1}^4 (C_{N_{(g)}}^2) \right] \right) \right] \setminus \left[ \prod_{y=3}^4 (C_{N_{(y)}}^2) \right] \right\} = 1 + \{16 \setminus 9\} = 2$$

$$\begin{aligned}
 \text{Pour } j = 3 \Rightarrow u &= \left[ z - \left[ \sum_{f=1}^2 \left[ [H_{(f)} - 1] \cdot \prod_{g=f+1}^4 C_{N_{(g)}}^2 \right] \right] \right] \text{MOD} \prod_{y=4}^4 C_{N_{(y)}}^2 \\
 &= \left( 16 - \left[ [H_{(1)} - 1] \cdot \prod_{g=2}^4 C_{N_{(2)}}^2 + [H_{(2)} - 1] \cdot \prod_{g=3}^4 C_{N_{(3)}}^2 \right] \right) \text{MOD} \prod_{y=4}^4 C_{N_{(4)}}^2 \\
 &= (16 - [0 + [1] \cdot (9)]) \text{MOD} (3) = 7 \text{ mod } 3 = 1 \neq 0, \text{ donc } \beta(j = 3) = 1
 \end{aligned}$$

$$H_{(j=3)} = 1 + \left[ z - \left[ \sum_{f=1}^2 \left[ [H_{(f)} - 1] \cdot \prod_{g=f+1}^4 C_{N_{(g)}}^2 \right] \right] \setminus \prod_{y=4}^4 C_{N_{(g)}}^2 \right] = 1 + [7 \setminus 3] = 3$$

Pour  $j = 4 \Rightarrow$

$$\begin{aligned}
 H_{(j=4)} &= Z \text{ Mod} \left( \sum_{f=1}^3 [H_{(f)} - 1] \cdot \prod_{g=f+1}^4 C_{N_{(g)}}^2 \right) \\
 &= (16) \text{ Mod} \left[ \left( [H_{(1)} - 1] \cdot \prod_{g=2}^4 C_{N_{(2)}}^2 \right) + \left( [H_{(2)} - 1] \cdot \prod_{g=3}^4 C_{N_{(3)}}^2 \right) + \left( [H_{(3)} - 1] \cdot \prod_{g=4}^4 C_{N_{(4)}}^2 \right) \right] \\
 &= (16) \text{ Mod} (0 + 9 + 6) = 16 \text{ Mod} 15 = 1
 \end{aligned}$$

Donc,  $H_{(j=1)} = 1$ ,  $H_{(j=2)} = 2$ ,  $H_{(j=3)} = 3$ ,  $H_{(j=4)} = 1$

Pour vérifier les derniers résultats, on applique l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 Z &= H_{(j=j)} + \left( \sum_{j=1}^{j-1} [H_{(j)} - 1] \cdot \prod_{y=j+1}^{j-1} C_{N_{(y)}}^m \right) = H_{(j=4)} + \left( \sum_{j=1}^3 ([H_{(j)} - 1] \cdot \prod_{y=j+1}^3 C_{N_{(y)}}^2) \right) \\
 &= H_{(j=4)} + [H_{(1)} - 1] \cdot (C_{N_{(2)}}^2 \cdot C_{N_{(3)}}^2 \cdot C_{N_{(4)}}^2) + [H_{(2)} - 1] \cdot (C_{N_{(3)}}^2 \cdot C_{N_{(4)}}^2) + [H_{(3)} - 1] \cdot (C_{N_{(4)}}^2) \\
 &= 1 + 0 + 9 + 6 = 16
 \end{aligned}$$

Maintenant, on calcule les combinaisons des points de liage  $B_{(H_{(j)})}$  selon H.

Pour  $j=1$ , on a  $H_{(j=1)} = 1$ ,  $N_{(j=1)} = 3$ ,  $m = 2$ , donc on recherche le premier nombre qui réalise l'inégalité suivante :  $x \geq (H_{(j=1)} = 1)$  - équation 4.13 - pour trouver la combinaison  $B_{(H_{(j)})}$ .

Pour  $m = 2$ , de l'équation (4.15) :

$$X = \sum_{f=N_{(j)}-1}^d f \quad \text{pour : } d = N_{(j)} - 1 \quad \text{to } 1$$



Pour;  $j = 1$  on a :  $d = 2$  to 1

$$X = \sum_{f=2}^d f = \sum_{f=2}^2 f = 2 \Leftrightarrow X = (H_{(j=1)}) = 2$$

On trouve que l'inégalité est réalisée quand  $d=2$ . Donc, à partir de l'équation (4.16), on détermine la combinaison  $B_{(H_{(j)})}$  correspondante :

$$B_{(H_{(j=1)})} = (b_1, b_2) \text{ où ; } \begin{cases} b_1 = N_{(j)} - d & = 3 - 2 = 1 \\ b_2 = N_{(j)} - X + H_{(j)} & = 3 - 2 + 1 = 2 \end{cases} \Rightarrow B_{(H_{(j=1)})} = (1, 2)$$

De la même manière, on trouve les autres combinaisons pour  $j=2$ ,  $j=3$  et  $j=4$  :

$$B_{(H_{(j=1)})} = (1, 2), B_{(H_{(j=2)})} = (1, 3), B_{(H_{(j=3)})} = (2, 3), B_{(H_{(j=4)})} = (1, 2)$$

Maintenant, on recherche la matrice de colonne  $P_{(t,j)}$  dont les éléments sont  $p_{(t,j)}$  pour chaque combinaison  $B_{(H_{(j)})}$  en se fondant sur la colonne la colonne  $j$  de la matrice réduite  $LR_{(I,J)}$  correspondant.

Par exemple, on prend la colonne  $j=1$  de la matrice réduite donné dans l'équation (4.27), ci après :

$$LR_{(I,J)} = LR_{(8,4)} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

$$LR_{(j=1)} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

La colonne  $j=1$  de la matrice de liage  $P_{(I,J)}$  est la suivante:

$$P_{(I,1)} = \begin{bmatrix} p_{(1,1)} \\ p_{(2,1)} \\ \vdots \\ p_{(t,1)} \\ \vdots \\ p_{(l,1)} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

En appliquant la formule donnée par l'équation (4.20), on trouve :

$$p_{t,1} = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum_{i=1}^t |l_{i,1}| \neq b_{k,1} \\ l_{t,1} & \text{si } \sum_{i=1}^t |l_{i,1}| = b_{k,1} \end{cases} \quad \text{puis } k \text{ et } t \text{ suivant} \Bigg\}, \text{ où : } \begin{cases} k = \text{de } 1 \text{ à } 2 \\ t = \text{de } 1 \text{ à } 8 \end{cases}$$

Donc, on obtient la première colonne de la matrice de liage  $P_{(t,j)}$

$$P_{(j=1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

De la même manière, on trouve les autres colonnes, et enfin on obtiendra la matrice de liage correspondante à la variante  $z=16$ .

$$P_{(I,J)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Pour vérifier si cette disposition des points de liage est réalisable, tous les fils de liage doivent avoir un embuvage identique.

De l'équation 4.21, on trouve le nombre de flotté  $N_{(j)}^f$ , prenant  $j=4$  par exemple, on trouve:

$$N_{(j)}^f = [(|p_{(1,j)}| - |p_{(i,j)}| + 1) \setminus 2] + \sum_{i=1}^{I-1} [(|p_{(i+1,j)}| - |p_{(i,j)}| + 1) \setminus 2]$$

$$N_{(j=4)}^f = [(|p_{(1,4)}| - |p_{(8,4)}| + 1) \setminus 2] + \sum_{i=1}^7 [(|p_{(i+1,4)}| - |p_{(i,4)}| + 1) \setminus 2]$$

$$= [(|p_{(1,4)}| - |p_{(8,4)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(2,4)}| - |p_{(1,4)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(3,4)}| - |p_{(2,4)}| + 1) \setminus 2] +$$

$$[(|p_{(4,4)}| - |p_{(3,4)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(5,4)}| - |p_{(4,4)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(6,4)}| - |p_{(5,4)}| + 1) \setminus 2] +$$

$$[(|p_{(6,4)}| - |p_{(5,4)}| + 1) \setminus 2] + [(|p_{(7,4)}| - |p_{(6,4)}| + 1) \setminus 2]$$

$$= [(|0| - |0| + 1) \setminus 2] + [(|-1| - |0| + 1) \setminus 2] + [(|0| - |-1| + 1) \setminus 2] + [(|0| - |0| + 1) \setminus 2]$$

$$+ [(|0| - |0| + 1) \setminus 2] + [(|-1| - |0| + 1) \setminus 2] + [(|0| - |-1| + 1) \setminus 2] + [(|0| - |0| + 1) \setminus 2]$$

$$= [1 \setminus 2] + [2 \setminus 2] + [0 \setminus 2] + [1 \setminus 2] + [1 \setminus 2] + [2 \setminus 2] + [0 \setminus 2] + [1 \setminus 2] = 2$$

De la même manière, on trouve ;  $N_{(j=1)}^f = N_{(j=2)}^f = N_{(j=3)}^f = 2$  et  $N_{(j=4)}^f = 2$

En se référant à l'équation 4.23, on trouve que la première condition est réalisée, donc on va vérifier la deuxième condition à partir de l'équation 4.22, pour calculer le nombre de fois que le fil de liage change de position entre les couches  $\Delta L_{(j)}^{f(k)}$  :

En prenant  $j=1$  de la dernière matrice  $P_{(i,j)}$ , où le nombre de flotté de liage est  $N_{(j=1)}^f = 2$ , on trouve que :

- Pour le premier flotté,  $k=1$ , où  $i=1$ , l'équation 4.22 n'est pas vérifiée et par conséquent pas de changement de niveau, soit :  $\Delta L_{(1)}^{f(1)} = 0$

- Pour la deuxième flotté,  $k=2$ , où  $i=4$ , l'équation 4.22 n'est pas vérifiée et par conséquent pas de changement de niveau, soit :  $\Delta L_{(1)}^{f(2)} = 0$

De la même manière, on calcule le nombre de changements de niveau pour les autres colonnes de la matrice, on trouvera ainsi :

$$\Delta L_{(1)}^{f(1)} = \Delta L_{(1)}^{f(2)} = 0 \Rightarrow \sum_{k=1}^{N_{(j=1)}^f} \Delta L_{(j=1)}^{f(k)} = 0$$

$$\Delta L_{(2)}^{f(1)} = \Delta L_{(2)}^{f(2)} = 0 \Rightarrow \sum_{k=1}^{N_{(j=2)}^f} \Delta L_{(j=2)}^{f(k)} = 0$$

$$\Delta L_{(3)}^{f(1)} = \Delta L_{(3)}^{f(2)} = 0 \Rightarrow \sum_{k=1}^{N_{(j=3)}^f} \Delta L_{(j=3)}^{f(k)} = 0$$

$$\Delta L_{(4)}^{f(1)} = \Delta L_{(4)}^{f(2)} = 0 \Rightarrow \sum_{k=1}^{N_{(j=4)}^f} \Delta L_{(j=4)}^{f(k)} = 0$$

En appliquant l'équation 4.23 on trouve que les deux conditions sont réalisées et par conséquent cette matrice de liage est valide. Elle sera insérée dans la matrice  $L_{(12,12)}$  puis dans la matrice de l'armure  $A_{(12,12)}$  pour être utilisée.

$$L_{(R_{tr}, R_{ch})} = L_{(12,12)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

Remarque : on remplace tous les (-1) par (0) dans l'armure  $A_{(R_{tr}, R_{ch})}$ .

$$A_{(R_{tr}, R_{ch})} = A_{(12,12)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

On suit les mêmes procédures pour  $z=1$  à  $z=81$  et on obtiendra les matrices de liage valides. Ensuite, on compare toutes les matrices qui ont le même embuvage pour rejeter toutes les matrices identiques. Cette comparaison peut être réalisée selon les procédures suivantes : symétries en chaîne, symétries en trame, permutation circulaire en chaîne en trame, rotation simple et multiple.

### 7.5. Description de programmation :

Ce module mathématique a été programmé par Visual basic et validé par une vérification mathématique sur un tissu triple couches liées par les chaînes de la couche intermédiaire (double liage par ascension et descension), figures (4.2).

Dans ce logiciel, la première étape consiste à définir tous les paramètres de tissu triple (tissu d'endroit, d'intermédiaire, et d'envers). Ces paramètres sont : proportions des chaînes, proportions des trame, rapports en chaînes et en trames, armures,...etc.

Dans la deuxième étape, le concepteur va créer manuellement les armures selon le motif désiré. Puis en cliquant sur le bouton « rechercher les points de liage », le programme va trouver automatiquement le maximum de points selon le taux de liage disponibles et générer et visualiser l'armure définitive du tissu triple sans les points de liage. En déterminant le taux de liage désiré, toutes les armures de liages correspondants seront visualisées, puis en cliquant sur l'une de ces armures de liage, l'armure sélectionnée sera

insérée automatiquement dans l'armure du tissu définitif qui est prêt à être transférée vers la machine à tisser.

## 8. Conclusion

Dans ce paragraphe, nous avons développé un module mathématique pour générer le maximum de points de liage disponibles dans un tissu triple couche liées par les chaînes de la couche intermédiaire (double liage par ascension et descension). Puis nous avons programmé ce module en Visual Basic pour obtenir un logiciel générant automatiquement la totalité des points de liage. Quelques vérifications mathématiques supplémentaires seront à effectuer pour vérifier la comptabilité du logiciel avec tous les types de tissus.

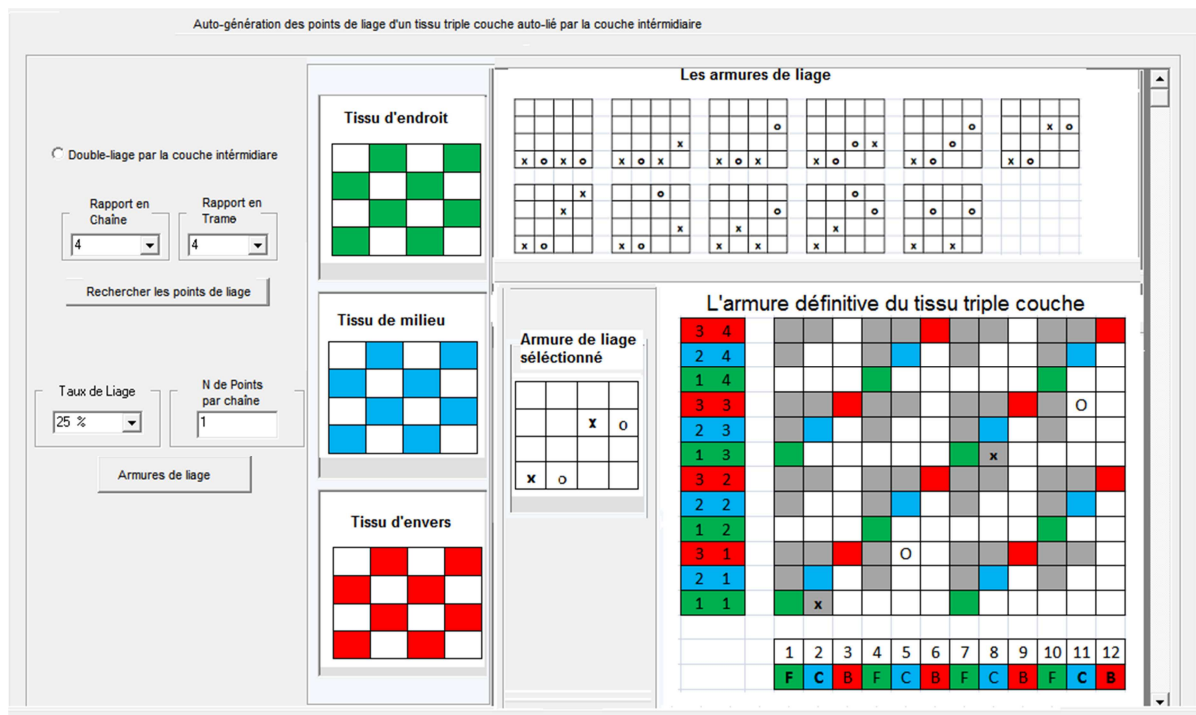


Figure 4. 2: L'interface du logiciel pour générer une armure du tissu triple couche



# **CHAPITRE 3**

## **TISSAGE MULTICOUCHE**





## 1. Le métier à tisser étroit:

Le tissage multicouche est une technique multilinéaire dont le principe est de faire entrecroiser deux séries de fils :

- La chaîne : ensemble de fils parallèles entre eux, divisés en plusieurs nappes
- La trame : fil déposé perpendiculaire à la chaîne.

Dans le tissage multicouche, chaque couche est formée d'une série des fils de chaîne indépendante et d'une série de fils de trame. Les fils de chaîne sont enroulés sur une ensouple indépendante. Par exemple, pour tisser un tissu triple couche, on a besoins de trois ensouples.

Pour produire les tissus multicouches que nous allons étudier, nous avons utilisé un métier à tisser de marque MÜLLER et de modèle NCE (figure 5.1). Ce métier est destiné au tissage multicouche, il possède 12 lames et permet de tisser sur une faible largeur de 35 cm, ce genre de métier est généralement utilisé pour tisser des produits de faible largeur comme les rubans , les sangles ou ceintures de sécurité [4].



Figure 5. 1 : Le métier à tisser MÜLLER - NCE

La sélection des fils de chaîne se fait au moyen d'un dispositif de formation de la foule qui commande le mouvement des lames, ce qui forme deux nappes distinctes (supérieure et inférieure) où l'angle formé entre eux s'appelle la foule.

L'insertion de la duite dans la foule se fait par l'intermédiaire de deux aiguilles, l'une sur la gauche (aiguille d'entrée) et l'autre sur la droite (aiguille de sortie). Le pré-délivreur va permettre de délivrer le fil à vitesse constante et ensuite un système de frein à coupelles et de ressort compensateur va réguler la tension. Le métier « CNE » est un métier de type Balbe à insertion de boucle, le doigt trameur (l'aiguille gauche) vient prendre la duite pour l'emmener au milieu et la transférer à l'autre doigt trameur (l'aiguille droite) qui la guide jusqu'à l'autre côté. À droite, un doigt de retenue maintient la duite afin de permettre à l'aiguille de liage de la bloquer avec le fil de liage.

Dans la machine de tissage « CNE », le dispositif de formation de la foule est composé principalement des organes d'entraînement commandants le mouvement des lames de tissage. Ces éléments sont des chaînons de chaîne-dessin constitués de maillons [4], (figure 5.2), (annexe2- paragraphe 2).

Un maillon haut va permettre de placer la lame en position haute tandis qu'un maillon bas va la placer en position basse. Ce qui permet de former la foule dans laquelle la duite sera insérée.



Figure 5. 2: Composition de la chaîne à maillons

Sur chaque axe de chaîne une duite est insérée dans la foule, donc le nombre des axes (appelé la longueur de rapport de chaîne-dessin) est égal au nombre de rangées de chaîne-dessin. Ce rapport est limité entre 16 et 44 axes en cas du notre métier « CNE » (figure 5.3.a).

La transformation des maillons et des axes en chaîne-dessin s'effectue (à l'aide de une planche, figure 5.3.b) suivant un dessin graphique appelé « guide de montage des maillons de chaîne d'armure, figure 5.4.a » qui dépend de la répartition des lames dans le métier à tisser.

Dans le métier à tisser CNE, dû à l'arrangement des leviers et des rappels en forme « V », la répartition des lames est en forme « V », où les lames No. 1, 3, 5, 7, 9, et 11 sont placées à gauche du centre et les lames No. 2, 4, 6, 8, 10, et 12 à droite, (figure 5.4.b).

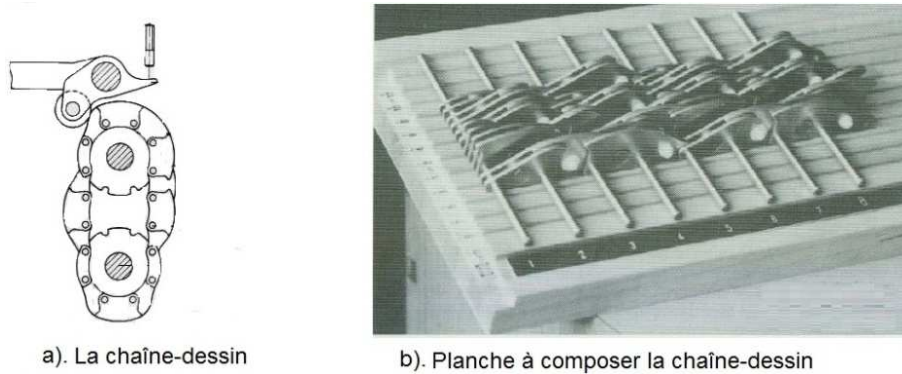


Figure 5. 3: La planche et la chaîne-dessin

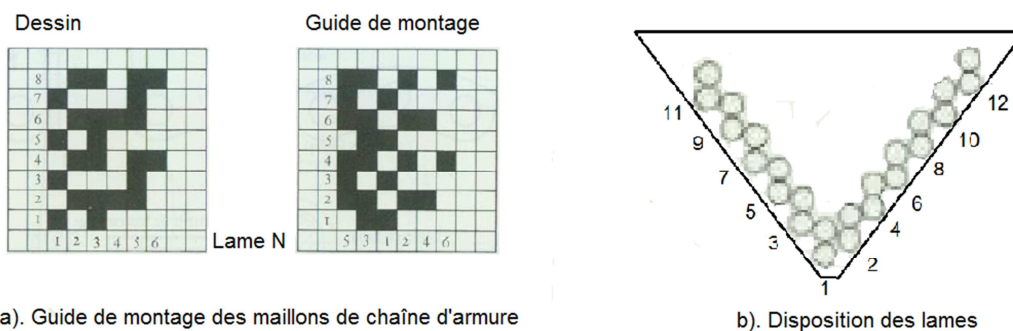


Figure 5. 4 : Répartition des lames en forme « V », guide de montage de chaîne d'armure

Il est important de noter ici qu'après avoir effectué l'opération de montage de la chaîne-dessin , il faut procéder de l'opération de synchronisation du dispositif de formation de la foule avec le dispositif de tissage pour éviter l'accrochage entre les fils de chaîne et les fils de trame pendant l'insertion des duites, (annexe2- paragraphe 3)

La vitesse d'appel du tissu est constante (appel continu), elle dépend du nombre de duites insérées par cm de l'article à tisser, en effet plus la vitesse d'appel est rapide plus le duitage sera faible.

La densité de duitage souhaitée peut être réglée par l'enchaînement des pignons Z1, Z2, Z3, et Z4, suivant le nombre de dents des pignons correspondant au duitage, figure 5.5. La

gamme standard de densités de duites pour le métier « CNE » est de 3 à 45 duites par cm. (Annexe2- paragraphe 1)

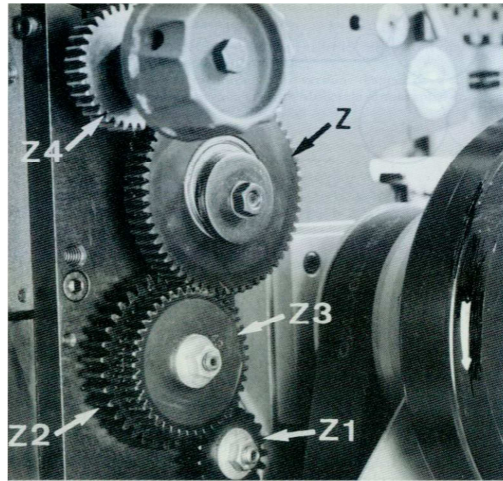


Figure 5. 5: La combinaison des pignons

## 2. Préparation au tissage :

### 2.1. Les fils :

Les fils utilisés dans notre recherche sont des fils polyamide PA 6.6 provenant de l'entreprise NEXIX. Les fils de chaîne sont des multifilaments de 940 dtex (128 filaments de 7,34 dtex/filament), tandis que les fils de trame sont des fils multifilaments de 470 dtex (68 filaments de 6,9 dtex/filament). On considèrera pour nos essais que le titre des filaments unitaire est pratiquement identique.

#### 2.1.1 Caractérisation des fils

Pour caractériser et vérifier la qualité d'un fil, les tests suivants ont été effectués :

##### 2.1.1.1 Détermination de la masse linéique (Titre du fil) :

La masse linéique est une grandeur physique qui mesure la masse par unité de longueur. On l'utilise pour caractériser les fibres, les microfibres, les fils, ..... etc. Le titre ou la masse linéique d'un fil peut être déterminé par le rapport suivant :

$$\text{Titre (tex)} = 1000 \cdot \frac{\text{Masse (gr)}}{\text{Longueur (m)}}$$

D'après les mesures effectuées sur 5 x 100 m sur 3 bobines (15 essais), nous obtenons les valeurs suivantes (tableau 2.1):

Tableau 2. 1 : Titre des fils de chaîne et de trame

	Chaîne	Trame
<b>Moy Masse (g)</b>	9,55	4,82
<b>Écart-type</b>	0,030	0,033
<b>CV %</b>	0,31	0,68
<b>Titre mesuré (dtex)</b>	955	482
<b>Titre réel (dtex)</b>	940	470

En trame le fil a été choisi deux fois plus fin car les duites insérées dans le tissu sont doublées cela revient donc à avoir des fils de chaîne et de trame de 940 dtex.

### 2.1.1.2 Détermination de la torsion :

La torsion d'un fil est caractérisée par le sens de torsion et le nombre de tours par mètre. Il existe deux types de torsion, qui dépendent de la direction dans laquelle on va filer les fibres : torsion en Z et en S, (figure 5.6). Un fil se retord dans le sens inverse du sens dans lequel il a été filé.

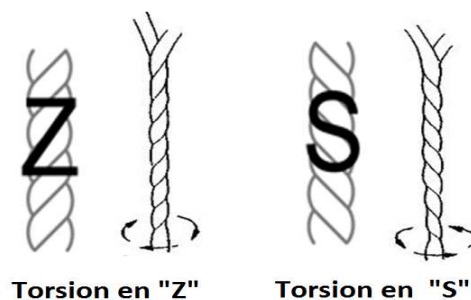


Figure 5. 6: Les sens de torsion

Les fils de chaîne et de trame sont tordus en Z. Pour calculer la torsion, nous avons utilisé le torsiomètre semi-automatique D314/1 Zweigle. Le coefficient de torsion  $\alpha_{Nm}$  est donné par la formule suivante :

$$\tau \text{ (tr/m)} = \alpha_{Nm} \cdot \sqrt{Nm} \quad \text{avec : } Nm = \frac{1000}{T \text{ (Tex)}}$$

D'après les mesures effectuées sur 5 x 50 cm sur 3 bobines (15 essais), nous obtenons les valeurs suivantes (tableau 2.2):

Tableau 2. 2: Torsion des fils de chaîne et de trame

	Chaîne	Trame
<b>Moy Torsion (tr/m)</b>	128	154
<b>CV %</b>	3,66	3,57
<b><math>\alpha_{Nm}</math></b>	39	34

Eu égard au Cv, le coefficient de torsion peuvent être considéré comme identique.

### 2.1.1.3 Essai de traction :

Pour effectuer ce test, nous avons utilisé le dynamomètre MTS 20 M, la cellule de mesure de 100 N et les pinces mécaniques. Cela permet d’obtenir la courbe Force - Allongement afin de déterminer la force de rupture, l’énergie nécessaire à la rupture, l’allongement maximum, la ténacité et le module d’Young.

Les calculs ont été effectués en assimilant le fil à un cylindre dont le diamètre est égal à :

$$d \text{ (cm)} = 0.036 \sqrt{\frac{T \text{ (tex)}}{\rho \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)}}$$

D’après les mesures effectuées sur 15 éprouvettes de 50 cm, nous obtenons les valeurs suivantes (tableaux 2.3 et 2.4):

Tableau 2. 3: Étude dynamométrique des fils de chaîne – 940 dtex

	Force rupture (N)	All max (%)	Ténacité (cN/tex)	Énergie rupture (J)	E (MPa)
Moyenne	58,81	16,59	61,44	2,16	43,05
CV%	3,47	5,83	3,36	12,25	2,95

Tableau 2. 4: Étude dynamométrique des fils de trame – 470 dtex

	Force rupture (N)	All max (%)	Ténacité (cN/tex)	Énergie rupture (J)	E (MPa)
Moyenne	36,70	18,84	76,15	1,55	35,22
CV%	1,54	1,93	1,54	4,50	3,35

### 2.1.1.4 Essai de flexion :

Ce genre de test se fait généralement à l’aide du KES FB2-SH (**Single Hair Bending Tester**), le module de flexion fibre/fil de Kawabata. Cependant les fils utilisés ayant une très faible résistance à la flexion, le capteur n’est pas assez sensible pour effectuer des relevés corrects.

On peut voir que même en multipliant le nombre de fils jusqu'à 10 (maximum possible sur cette taille de pince), la courbe reste à 0, (figure 5.7).

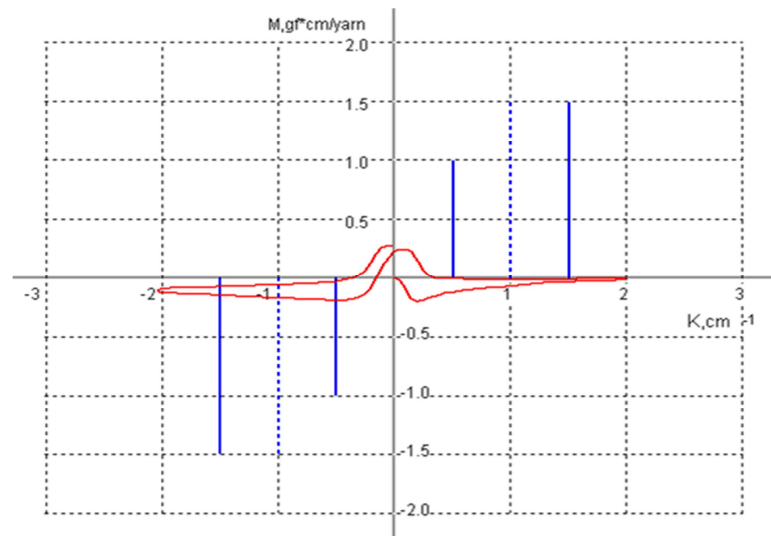


Figure 5. 7: Test de flexion sur 10 fils

Les essais ont donc dus être réalisés sur le KES FB2 (figure 5.8), le module de flexion tissu de Kawabata en utilisant des éprouvettes de 60 fils parallèles afin d'obtenir des valeurs acceptables, (figure 5.9).



Figure 5. 8: Dispositif de test de flexion KES FB2

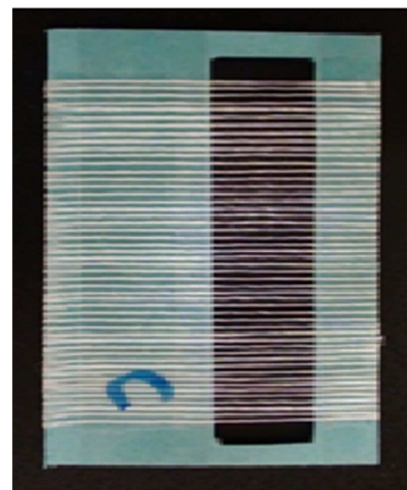


Figure 5. 9: Éprouvettes de 60 fils parallèles

Le logiciel fournit un courbe moment de flexion en fonction de la courbure et calcule la rigidité de flexion, (Figure 5.10).



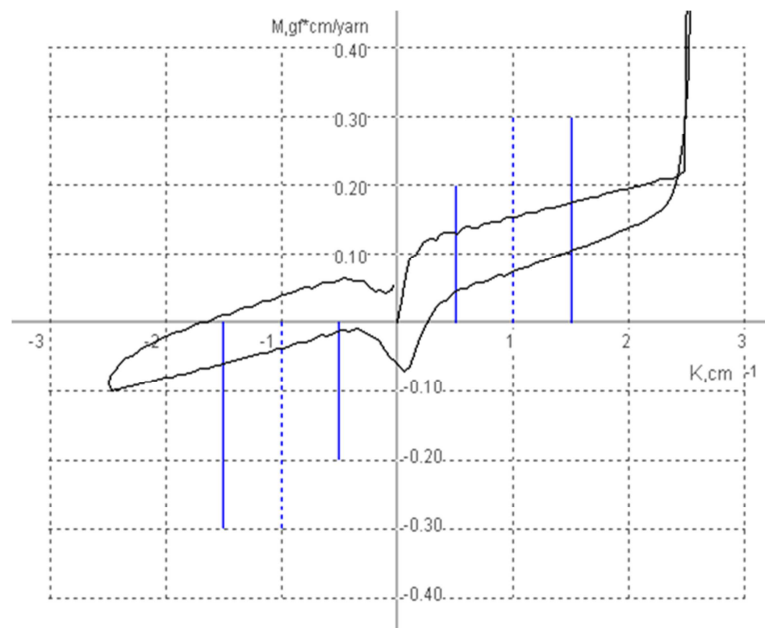


Figure 5. 10: Test de flexion sur 60 fils

D'après les mesures effectuées sur 15 éprouvettes de 60 fils, nous obtenons les valeurs suivantes, (tableau 2.5) :

Tableau 2. 5: Test de flexion sur les fils de chaîne et de trame

	Chaîne	Trame
La rigidité moyenne, B (gf.cm <sup>2</sup> ),	0,0132	0,0079
CV %	1,09	1,77

## 2.2. Alimentation de la machine à tisser

Habituellement, la machine à tisser est alimentée par des ensouples, ce sont des rouleaux rassemblent les fils de chaîne enroulés parallèlement les uns aux autres sous même tension (Cf. figure 1.2).

Dans notre cas, nous désirons tisser un tissu multicouche à 3 couches, donc la machine devrait être alimentée par 3 ensouples. La couche intermédiaire doit être liée avec la couche supérieure et la couche inférieure. Le dessin de ce liage pouvant être quelconque.

L'évolution des fils de liage pourrait se faire avec des embuvages différents. Il est donc souhaitable d'alimenter la chaîne intermédiaire à partir d'un cantre bobines.

La solution qui sera retenue pour notre cas est la suivante :

- chaîne supérieure : 264 fils/940 dtex sur ensouple.
- chaîne inférieure : 264 fils/940 dtex sur ensouple.
- chaîne intermédiaire : 264 bobines/940 dtex sur cantre, amenée directement du cantre au métier à tisser.

Dans ce cas particulier de montage, l'encantrage sera effectué comme décrit au paragraphe suivant.

### **2.3. Encantrage :**

L'encantrage ou garnissage, consiste à placer les bobines de fil sur les broches du cantre ou râtelier. Le cantre utilisé se compose de deux cadres porte-bobines parallèles, avec des broches extérieures appelé cantre à sorties extérieures.

La capacité du cantre utilisé ou le nombre maximum de bobines qu'il peut supporter est de 280 bobines, distribuées sur les deux côtés du cantre, chaque côté comprend 10 rangées et 14 colonnes.

Les 264 bobines cylindriques sont mises en place sur le cantre et constitueront la deuxième couches du tissu triple couches. Ils sont amenés au métier à tisser en sorties extérieures et piquage par colonne, (figure 5.11).

Tant que la longueur libre des fils varie en fonction de la position de la bobine sur le cantre, les fils n'auront pas la même tension, donc la tension de chaque fil est régularisée par des tendeurs à coupelles posées sur les fils afin qu'on leur donne des tensions presque identiques et homogènes. Les fils passent au travers des dents d'un peigne puis autour d'un tendeur



Figure 5. 11 : Encantrage et montage des ensouples

#### 2.4. Rentrage et piquage au peigne:

**Le rentrage** par définition est l'opération qui consiste à faire passer un par un tous les fils portés par les ensouples placées à l'arrière du métier à tisser dans les œillets des lisses fixées dans les lames et reliées aux cadres. Cette opération s'effectue dans un ordre bien déterminé en respectant plusieurs conditions[2], [3], comme :

- La simplicité
- Comporter le minimum des lames compte-tenu :
  - De l'armure
  - De la contexture
  - Du type de lisses
  - De la charge des lames et de la vitesse des métiers
- Ne pas créer de stries en chaîne ou en trame
- Ne pas créer de casses en chaîne

Il y a différentes sortes de rentrage, comme : rentrage suivi, sauté, en pointe, ....., etc. La figure 5.12 montre les différents modes.

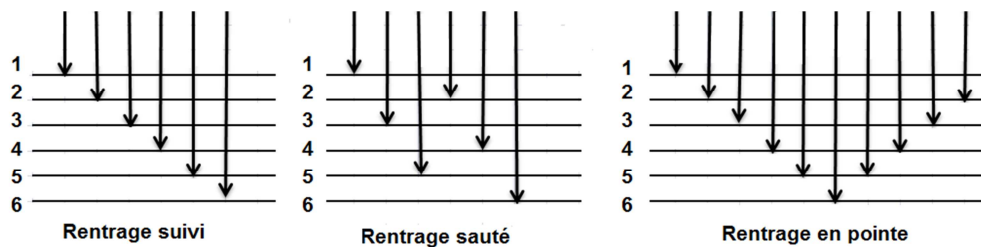


Figure 5. 12: Différents modes de rentrage

Dans le métier à tisser Muller « CNE », les 12 lames sont réparties en 3 corps égaux (4 lames par couche) dans l'ordre suivant :

- Les lames N : 1, 2, 3 et 4 sont réservées pour le tissu intermédiaire
- Les lames N : 5, 6, 7 et 8 sont réservées pour le tissu d'endroit
- Les lames N : 9, 10, 11 et 12 sont réservées pour le tissu d'envers

Comme nous allons utiliser des armures simples pour notre tissu, on utilise le rentrage suivi pour chaque couche, en suivant l'ordre des cadres, où le premier fil de chaîne d'endroit est rentré dans la lisse du premier cadre du deuxième corps (lame N° 5), le premier fil de chaîne est rentré dans la lisse du premier cadre du premier corps (lame N° 1), alors que le premier fil de chaîne d'envers est rentré dans la lisse du premier cadre du troisième corps (lame N° 9), puis le deuxième fil de chaîne d'endroit est rentré dans une lisse du deuxième cadre du deuxième corps (lame N° 6) et ainsi de suite jusqu'au l'arrivé au dernier cadre (lame N12 dans notre cas) puis on recommence de nouveau dans le même ordre, (figures 5.13).

**Le piquage au peigne:** cette opération consiste à placer les fils de chaîne dans les dents du peigne en fonction de la densité des fils de chaîne (compte chaîne) et la complexité du tissu.

Dans notre cas (figures 5.13), nous avons un tissu triple couche de largeur 33 cm à (264 fils x 3 couches= 792 fils), donc d'un côté la densité des fils de chaîne est à 24 fils/cm, et de l'autre côté, nous mettrons 3 fils consécutifs par dent (un fil de chaque couche). On peut alors utiliser un peigne de 8 (8 dents par cm) car  $24/3 = 8$ .

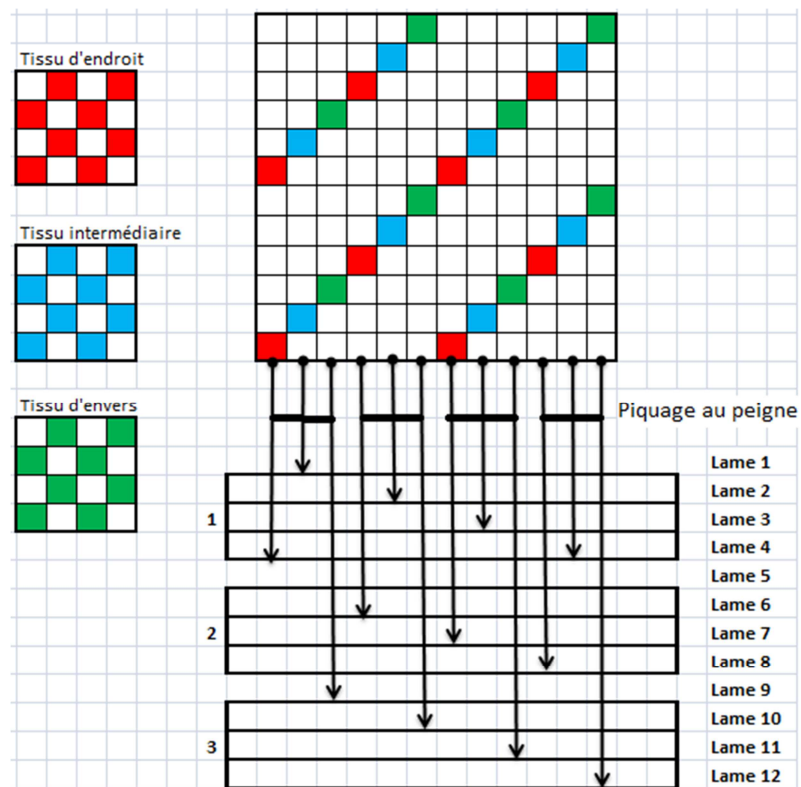


Figure 5. 13: Rentrage pour un tissu triple couche

### 3. Propriétés mécaniques et paramètres de construction de tissu:

L'étude des relations entre les propriétés mécaniques et les paramètres de fabrication de tissu est toujours l'objectif de nombreux chercheurs. Chen et al [43] ont abordé la relation entre le taux de liage et les propriétés mécaniques (traction et cisaillement) pour des structures textiles tissées. Ils ont effectué cette étude sur deux types de tissus aramide: un tissu double couche et un tissu triple couche. Ils ont choisi 3 différents rapports d'armure (4, 6 et 8) et avec 6 taux de liage différents (1/4, 1/6, 2/6, 1/8, 2/8 et 3/8). Ils ont montré que le module de traction en sens chaîne a une relation linéaire négative avec le taux de liage tandis que cette relation linéaire est positive en cas de cisaillement.

Elsayed et al [44] ont cherché l'influence de l'armure (type de tissu) et de la méthode de liage sur les propriétés mécaniques (la force et l'allongement à la rupture, la déchirure et la rigidité de flexion) pour un tissu double couche en coton. Pour les 4 tissus étudiés avec les 6 types de liage, ils ont choisi la toile pour le tissu d'endroit tandis que le tissu d'envers est soit

de la toile, soit du sergé, soit de satin ou tissu poche. Cinq modes de liage ont été choisis: l'ascension, la descension, le double liage, liage avec changement de face. L'analyse statistique des résultats obtenus a montré que le type de liage n'a pas d'effet important sur les propriétés mécaniques tandis que cet effet est très important en cas de changement d'armure.

Chen et al [45] ont cherché l'influence de taux de liage, de l'armure et du nombre de couches sur la propriété mécanique (traction) de différents tissu multicouches (tissu double, triple et quadruple). Ils ont montré que plus le nombre de couches est élevé plus la résistance à la traction est élevée, c'est le cas dans les deux sens chaîne et trame, mais cette résistance est plus grande dans le sens trame.

Ils ont aussi montré que l'impact de l'armure sur la résistance à la traction dans tissu double couche n'est pas évident. En ce qui concerne l'influence du taux de liage, ils ont utilisé 3 taux de liage différents (2/16, 3/16, et 4/16) pour un rapport d'armure 16, ils ont montré que la résistance à la traction diminue quand la densité de liage augmente.

Bien que ces études montrent des résultats significatifs sur l'effet de quelques paramètres sur quelques propriétés mécaniques des tissus, il reste un travail important à mener car tous les paramètres n'ont pas été pris en compte. Nous allons dans notre travail élargir l'étude pour inclure la plupart des propriétés mécaniques en cherchant leurs relation avec les paramètres (armure, distribution des points de liage et duitage) dans un tissu triple couches. Nous allons utiliser un rapport d'armure de 4 et un taux de liage de 25 % pour toutes les différentes combinaisons d'armures.

#### **4. Armures des couches :**

Les tissus multicouches à produire et à tester lors de notre recherche sont des étoffes composées de trois tissus superposés et liés entre eux par des ascensions et descensions de la chaîne de la couche intermédiaire sur les trames des couches supérieures et inférieures, de façon à obtenir un seul et même tissu. Ces couches sont tissées simultanément et sont chacune formées d'une chaîne et d'une trame. Nous avons donc 3 nappes de chaîne à l'entrée

de la machine et une trame insérée successivement dans la couche d'endroit, celle du milieu puis celle de la couche d'envers.

Notre étude dans cette partie du rapport a le but d'extraire l'impact de l'armure, la distribution des points de liage et le duitage sur les propriétés mécaniques des tissus. Mais , d'un côté , il est impossible de produire toutes les combinaisons d'armures existantes afin de les tester, cela prendrait beaucoup trop de temps, et de l'autre côté , ces tissus sont destinés à être des renforts pour les matériaux composites, il faut donc choisir des armures simples afin d'obtenir un matériau le plus régulier possible [46].

Il est bien connu que la difficulté de tissage varie en fonction des armures, et que la résistance du tissu dépend fortement de l'armure [13]. L'armure toile offre une solidité maximale au tissu, pour cela nous allons proposer d'adopter l'armure toile pour chacun des trois tissus constituant le tissu triple pour le premier tissu (tissu A) , puis nous allons faire varier l'armure du tissu intermédiaire en choisissant l'armure sergé pour le deuxième tissu (tissu B) et l'armure cannelé pour le troisième tissu (tissu C) , (figure 5.14) .

Nous avons donc choisi de nous limiter à trois armures fondamentales (toile, sergé et cannelé) comme suit :

- Armure du tissu endroit : toile
- Armure du tissu intermédiaire : toile, sergé 4 et cannelé 3 /1
- Armure du tissu d'envers : toile

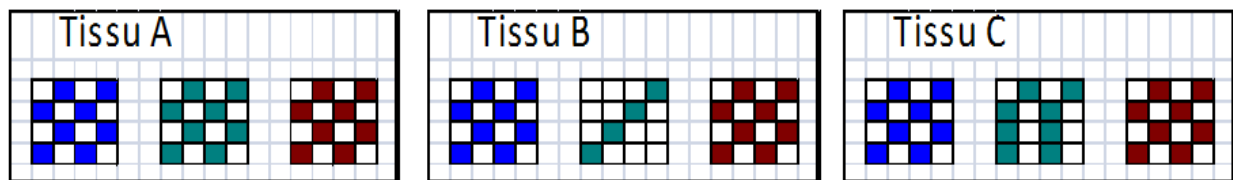


Figure 5. 14: Les trois armures choisies

## 5. Armure de liage :

### 5.1. Génération des armures de liage

À l'aide du logiciel décrit au chapitre 2, nous avons généré les différentes possibilités de liage (armures de liage) suivant les armures des trois couches et la densité de liage choisie, (figure 5.15).

Nous avons constaté que pour chaque tissu généré, il y a nombreuses possibilités de liage pour différents taux de liage, sachant que le taux de liage varie entre 25%, 50%, 75% et 100% pour un tissu de rapport 4 en chaîne et en trame, (tableau 2.6) .

Tableau 2. 6 : Nombre de possibilités de liage

	Taux de liage			
	25%	50%	75%	100%
Tissu A	11	17	13	0
Tissu B	9	5	1	0
Tissu C	10	5	1	0

Pour ne pas faire varier trop de paramètres à la fois, nous avons choisi de fixer le taux de liage à 25%, soit une ascension ou une descension du fil de chaîne toutes les quatre duites.

Bien que nous ayons limité le taux de liage à 25%, il reste encore un nombre important des possibilités de liage (30 armures de liage pour les trois tissus à étudier). Le nombre des tissu dans ce cas est trop important sachant que nous allons prendre 3 duitages différents pour chaque tissu, car tisser et tester les  $30 \times 3=90$  tissus nécessite de réaliser un nombre trop important d'essais hormis le temps nécessaire pour achever le processus de tissage et de tests.

Afin de choisir le nombre de tissus à fabriquer et à tester, nous devons mettre en place des paramètres de choix spécifiques.





Figure 5. 15: Les armures de liages générés par le logiciel pour les armures données

## 5.2. Classification des armures de liage

En raison de l'absence de toute étude abordant la classification des points de liage ou les armures de liage suivant leurs répartitions dans le tissu, il nous a semblé nécessaire de classer ou grouper les armures de liage suivant leurs dispersions dans le tissu en cherchant un indice ou un paramètre pour caractériser la dispersion ou répartition des points de liage dans un tissu. Deux méthodes sont discuté dans ce but, ces sont :

- La méthode du moment d'inertie
- La méthode du plus proche voisin

### 5.2.1 La méthode du moment d'inertie

La première est de mesurer l'inertie totale de chaque armure de liage en se fondant sur le principe suivant : plus les points de liage sont concentrés, plus le moment sera faible.

On calcule la somme des carrés des distances des points par rapport au centre de l'armure de liage en considérant que la masse ponctuelle de chaque point de liage égal à 1, soit :  $m_i = 1$ , et la dimension de chaque carré ( cellule ) dans l'armure égal à 1 , (figure 5.16).

Cette calcule est effectué en utilisant l'équation suivante :

$$I_x = \sum_{i=1}^n m_i \cdot d_i^2 , \quad I_y = \sum_{i=1}^n m_i \cdot d_i^2 , \quad I_z = \sum_{i=1}^n m_i \cdot d_i^2 , \quad I = I_x + I_y + I_z$$

Le calcul du centre de distribution des points de liage dans l'armure est effectué au moyen des équations suivantes :

$$x_c = \frac{\sum x_i}{4} , \quad y_c = \frac{\sum y_i}{4} , \quad z_c = \frac{\sum z_i}{4}$$

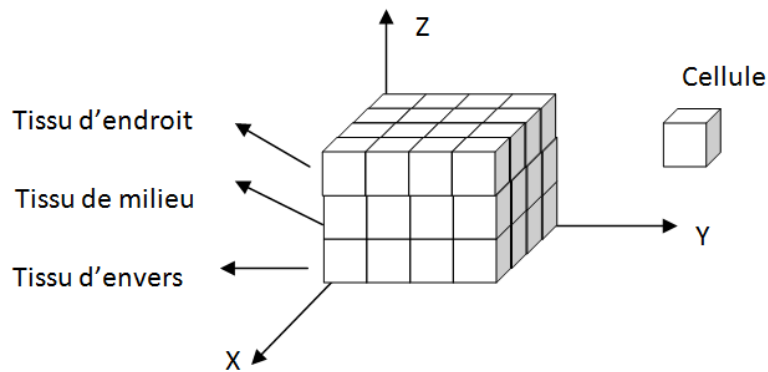
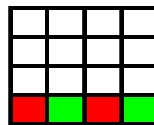


Figure 5. 16: Représentation cubique du tissu triple

Prenant comme exemple, l'armure de liage suivante :



$$x_c = \frac{\sum x_i}{4} = \frac{0,5 + 1,5 + 2,5 + 3,5}{4} = 2$$

$$y_c = \frac{\sum y_i}{4} = \frac{0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5}{4} = 0,5$$

$$z_c = \frac{\sum z_i}{4} = \frac{2,5 + 0,5 + 2,5 + 0,5}{4} = 1,5$$

$$I_x = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^4 (x_i - x_c)^2 = (0,5 - 2)^2 + (1,5 - 2)^2 + (2,5 - 2)^2 + (3,5 - 2)^2 = 5$$

$$I_y = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^4 (y_i - y_c)^2 = (0,5 - 0,5)^2 + (0,5 - 0,5)^2 + (0,5 - 0,5)^2 + (0,5 - 0,5)^2 = 0$$

$$I_z = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^4 (z_i - z_c)^2 = (2,5 - 1,5)^2 + (0,5 - 1,5)^2 + (2,5 - 1,5)^2 + (0,5 - 1,5)^2 = 4$$

$$I = I_x + I_y + I_z = 5 + 0 + 4 = 9$$

De la même manière, on calcule tous les moments d'inertie pour toutes les armures de liage d'un taux de liage de 25%. Les différents liages générés par notre programme ont été regroupés selon leur moment d'inertie, (figure 5.17). Le moment d'inertie est cité sous chaque armure.

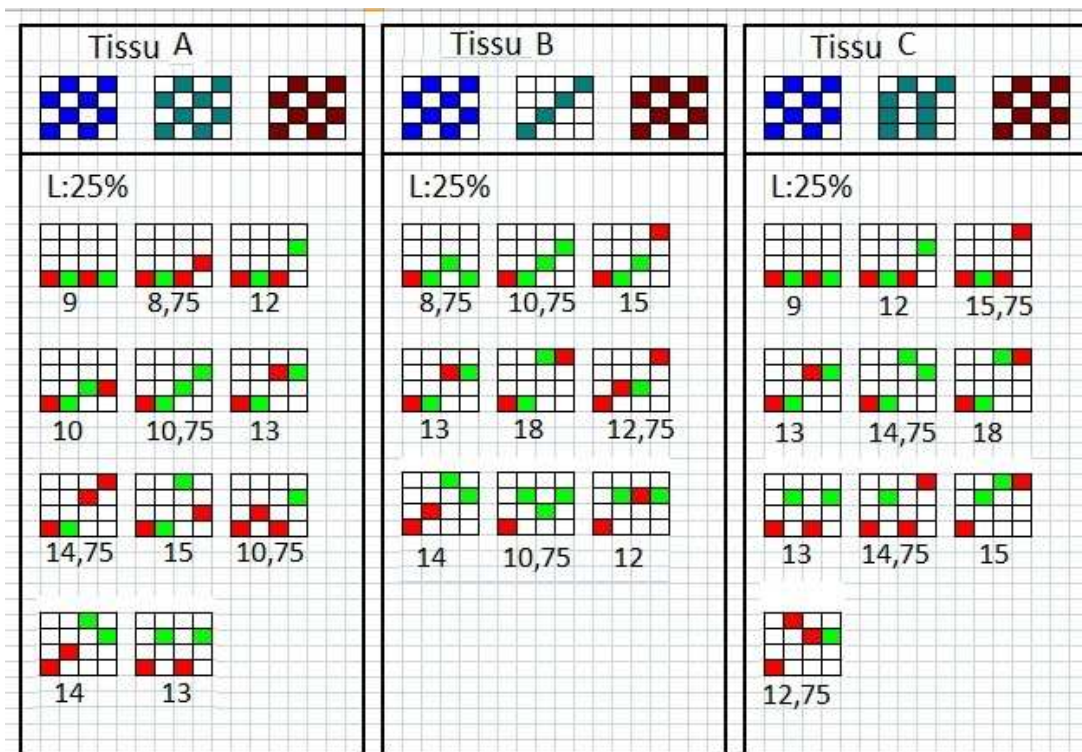


Figure 5. 17: Les moments d'inertie pour les armures de liage

La figure 5.18 montre ces armures de liage regroupées suivant leur effet après l'extension de chaque armure 3 fois dans les deux sens. De cette figure, on peut constater que cette méthode ne tient compte que d'un motif d'armure de liage et non de ses voisins.

Par exemple, pour un taux de liage de 25%, l'armure de liage **A** a le moment d'inertie le plus élevé et la B le plus faible, alors que si on étend les deux motifs, les répartitions des points de liage sont identiques, (figure 5.19). Donc, on peut déduire que cette méthode comporte une faiblesse et elle n'est pas tout à fait correcte pour classer les armures de liage.

Effet d'armure de liage	Armure de liage	Effet d'armure de liage	Armure de liage	Effet d'armure de liage	Armure de liage
	 <b>I=9</b>		 <b>I=18</b>  <b>I=13</b>		 <b>I=13</b>
	 <b>I=8,75</b>  <b>I=8,75</b>  <b>I=15,75</b>		 <b>I=10,75</b>  <b>I=14,75</b>  <b>I=12,75</b>		 <b>I=14</b>
	 <b>I=12</b>  <b>I=12</b>		 <b>I=15</b>  <b>I=15</b>  <b>I=15</b>		 <b>I=13</b>
					 <b>I=10,75</b>  <b>I=10,75</b>  <b>I=14,75</b>

Figure 5. 18: Regroupement des armures de liage selon leur effet

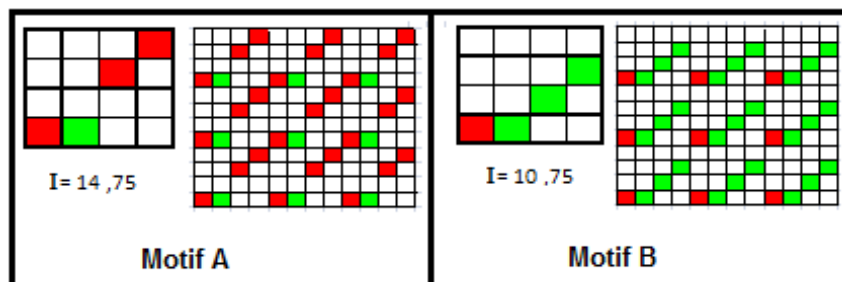


Figure 5. 19 : Armures de liage A et B avec les motifs étendus

### 5.2.2 La méthode du plus proche voisin :

Supposons que nous ayons 4 points répartis sur une surface carrée selon deux méthodes différentes, (figures 5.20 a et 5.20 b).

Visuellement, en estimant la distance entre ces points, on peut facilement remarquer que la seule différence entre les deux répartitions, c'est que les points sont concentrés dans la surface A et dispersés dans la surface B. Mais notre vision va changer rapidement quand on sait que ces deux surfaces sont extraites d'une surface plus grande, de deux positions différentes, (figure 5.20.c).

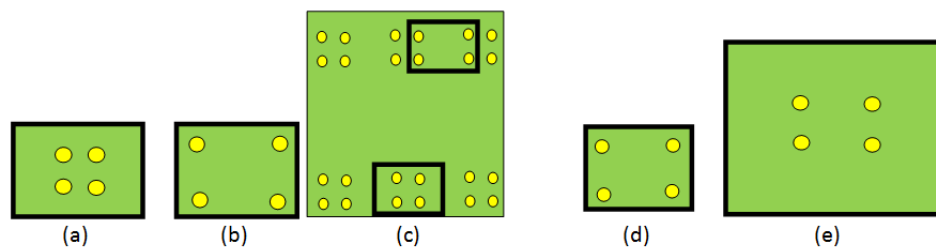


Figure 5. 20: Répartitions des points sur une surface

Un autre paramètre qui a une influence très importante sur notre décision, c'est la dimension de la surface contenant les points (la zone d'étude). Les figures 5.20.d et 5.20.e illustrent la façon dont des distributions identiques des points peuvent être dispersées ou agrégées selon la zone d'étude spécifiée.

Donc, on peut déduire que pour donner un avis précis sur la répartition des points dans une surface A, il faut que la surface B extraite de A soit représentative.

Mathématiquement, nous pouvons connaître le degré de dispersion des points sur une surface en déterminant la relation entre le nombre de points, la taille de la surface et la distance entre ces points. Cette relation peut être exprimée par un paramètre numérique appelé l'indice du voisin le plus proche  $R$  [47], [48].

Si l'indice est inférieur à 1, le modèle présente un phénomène de concentration, si l'indice est supérieur à 1, la tendance est à la dispersion.

L'indice du voisin le plus proche est calculé en fonction de : [49]

- la distance minimum de chaque entité par rapport à son entité avoisinante la plus proche  $d_{min}(ij)$
- La surface « S » : de simples variations dans ce paramètre peuvent provoquer des variations sensibles dans l'indice du voisin le plus proche.
- Le nombre d'entités « N »
- La distance moyenne  $\overline{D_{min}}$  et la distance théorique  $D_T$

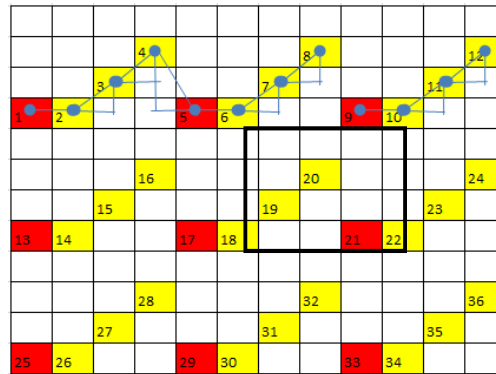
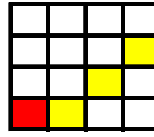
$$R = \frac{\frac{\sum d_{min}}{N}}{\frac{0,5}{\sqrt{\frac{N}{S}}}} = \frac{\overline{D_{min}}}{D_T}$$

Après avoir présenté la méthode de la plus proche voisin, on l'applique afin d'obtenir une information quant à la répartition des points de liage dans une armure en répétant l'armure de liage 3 fois dans les deux sens (chaîne et trame) pour que la zone d'études soit représentative.

La figure 5.21 illustre un exemple d'application de cette méthode sur une des armures de liage à étudier.

De la même manière, on calcule l'indice de voisinage pour chaque armure de liage généré. La figure 5.22 montre les armures de liage et l'indice de dispersion correspondant.

Point « i »	Point « j »	Distance « $d_{min(ij)}$ »
1	2	1
2	3	1
3	4	1,414
4	3	1,414
5	6	1
6	7	1
7	8	1,414
8	7	1,414
9	10	1
10	11	1
11	12	1,414
12	11	1,414
13	14	1
14	15	1
15	16	1,414
16	15	1,414
17	18	1
18	19	1
19	20	1,414
20	19	1,414
21	22	1
22	23	1
23	24	1,414
24	23	1,414
25	26	1
26	27	1
27	28	1,414
28	27	1,414
29	30	1
30	31	1
31	32	1,414
32	31	1,414
33	34	1
34	35	1
35	36	1,414
36	35	1,414
$\sum d_{min}$		43,452
Distance moyen $\overline{D_{min}} = \frac{\sum d_{min}}{36}$		1,21
$R = \frac{\overline{D_{min}}}{D_T} = \frac{\overline{D_{min}}}{1}$		1,21



N = Nombre de points de liage = 36

S = Surface (nombre de cases) = 144

D = Densité (taux de liage) =  $\frac{N}{S} = 0,25$

$D_T$  = Distance théorique moyenne =  $\frac{0,5}{\sqrt{D}} = 1$

$d_{min}(ij)$  = Distance d'un point « i » à son plus proche voisin « j »

$\overline{D_{min}}$  = Moyenne des distances  $\overline{D_{min}} = \frac{\sum d_{min}}{N}$

R = Indice de dispersion =  $\frac{\overline{D_{min}}}{D_T}$

Figure 5. 21: Exemple de méthode du plus proche voisin



Effet d'armure de liage	Armure de liage	Effet d'armure de liage	Armure de liage	Effet d'armure de liage	Armure de liage
	 <b>R=1</b>		 <b>R=1</b>		 <b>R=1</b>
	 <b>R=1,14</b>  <b>R=1,03</b>  <b>R=1,24</b>		 <b>R=1,21</b>  <b>R=1,21</b>  <b>R=1,21</b>		 <b>R=1,41</b>
	 <b>R=1,31</b>  <b>R=1,31</b>		 <b>R=1,34</b>  <b>R=1,32</b>  <b>R=1,32</b>		 <b>R=2</b>
					 <b>R=1,62</b>  <b>R=1,62</b>  <b>R=1,82</b>

Figure 5. 22: les armures de liage et l'indice de dispersion correspondant

En se fondant sur la figure 5.22, on peut constater que bien que cette méthode tienne compte du motif d'armure de liage et de ses voisins, il y a des motifs qui ont un indice de voisinage différent pour de mêmes répartitions de points de liage. En revanche, en comparaison avec la méthode des moments d'inertie, on a constaté que d'un côté le taux de

différence est plus petit dans la méthode du plus proche voisin et de l'autre côté elle est la plus simple et la plus visuelle. Nous choisissons donc de garder avec précaution l'indice de dispersion comme valeur permettant de caractériser la dispersion des points de liage et pour classer les armures de liage suivant la dispersion des points de liage dans l'armure.

### 5.2.3 Choix des armures de liage :

Selon la répartition des points de liage, les indices de dispersion pour l'ensemble des armures de liage sont entre 1 et 2. On peut regrouper ces armures suivant les valeurs de leur indice de dispersion. On peut constater qu'on a :

6 armures de liage ayant l'indice :  $1 \leq R \leq 1,2$  ,

4 armures entre  $1,2 < R \leq 1,3$

6 armures entre  $1,3 < R \leq 1,4$

7 armures entre  $1,6 < R \leq 2$

Donc, suivant ce nouveau regroupement, on a décidé de choisir des armures de liage ayant l'indice de dispersion entre 1 et 1,4 en prenant trois armures ayant un indice différent de l'autre.

La première armure de liage que nous avons choisi est celle qui a l'indice de dispersion 1, la deuxième armure est celle qui a l'indice de dispersion 1,21, tandis que la troisième armure a l'indice de dispersion 1,32. La figure 5.23 montre le choix définitif des trois armures de liage.

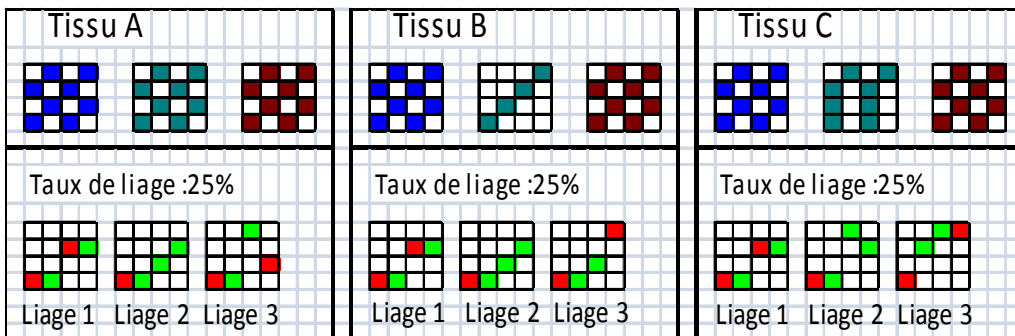


Figure 5. 23: Les armures des tissus et leurs armures de liage

## 6. Duitage :

L'insertion par définition, c'est l'opération qui consiste à faire passer le fil de trame (duite) entre les fils de chaîne pour fabriquer un tissu. Le duitage désigne par le nombre de duites insérées sur une longueur d'un cm du tissu (duites par cm).

Le choix du duitage lors de tissage est très important, car un duitage très fort peut conduire à casser les fils et user des éléments du métier à tisser en raison de la saturation du tissu.

La saturation du tissu par définition, c'est la nombre maximal de fils ou de duites pouvant être insérées par unité de longueur dans un tissu donné [50], elle peut être exprimée par un paramètre nommé « l'indice de saturation ».

Donc il y a une limite que ne doit pas être dépassée lors de l'opération de tissage. Cette limite de tissabilité a été beaucoup recherchée, et nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées pour résoudre ce problème pour des étoffes à simple structure constituées d'une chaîne et d'une trame. Ces études sont fondées la géométrie de ces structures et en définissant un modèle géométrique de référence [51]–[55].

Mais ce problème n'est presque pas abordé pour les étoffes multiples (tissu composé de plus d'une couche) à cause de la difficulté de définir un modèle géométrique pour ce type de structures textiles. Cette complexité vient des paramètres qui influencent l'opération de tissage de ces structures, comme le titre des fils, la matière de fils, le compte, le duitage, les armures, la complexité du tissu, la vitesse de tissage, la tension des fils, ..., etc. [56]–[59].

M. Tulemat [50] dans son travail présenté en 2007 a abordé une approche pour calculer l'indice de saturation pour le tissu poche complexe qui est un type du tissu à double face.

Dans notre recherche, comme pour les armures et les liages, nous allons tisser les tissus avec trois duitage différents, (duitage fort, duitage moyen, duitage faible), donc nous devons tout d'abord déterminer le duitage maximum.

En réalité, en raison de l'absence d'études qui abordent le sujet de la saturation pour le tissu complexe à trois couches, on n'a pas été possible de calculer le duitage maximum pour notre tissu.

Toutefois, des études récentes menées par Dalal [60] sur la saturation des tissus complexes amènent de nouvelles réponses à ce problème. À partir de ces études, et avec son aide, il ressort qu'il n'est pas possible de dépasser 28 duites/cm pour les différents tissus à tisser.

Nous avons appliqué le duitage proposé sur le tissu A (toile-toile-toile), on a constaté que le tissu devient très saturé et le peigne vient frapper le façade du tissu qui ne semblait plus avancer assez vite. Ceci a conduit à des casses fréquentes du fil de trame et à la perte de tension de fils de chaîne. Donc nous avons essayé avec un duitage 26 duites/cm, mais le problème de casse de fil de trame est toujours existant.

On a testé le duitage 24 duites/cm, le tissage a continué sans problème, on a donc fixé ce duitage comme le duitage maximum pour les trois tissus qu'on a choisi à tisser. Pour un duitage moyen et faible, nous avons choisi 20 et 16 duites/cm.

## 7. Conclusion

Enfin, nous pouvons maintenant résumer ce qui a été mentionné dans ce chapitre. Trois armures (A, B et C), trois liages (L1, L2 et L3) et trois duitages (16, 20 et 24) ont été choisis, ce qui signifie qu'en effectuant toutes les combinaisons possibles on obtiendrait 27 tissus différents. Sachant que le tissu A avec le liage L1 est désigné par A1, et le tissu A avec le liage L2 est désigné par A2 et ainsi de suite, (figure 5.24).

Les guides de montage de chaîne-dessin pour ces armures sont expliqués en (annexe2-paragraphe 4).

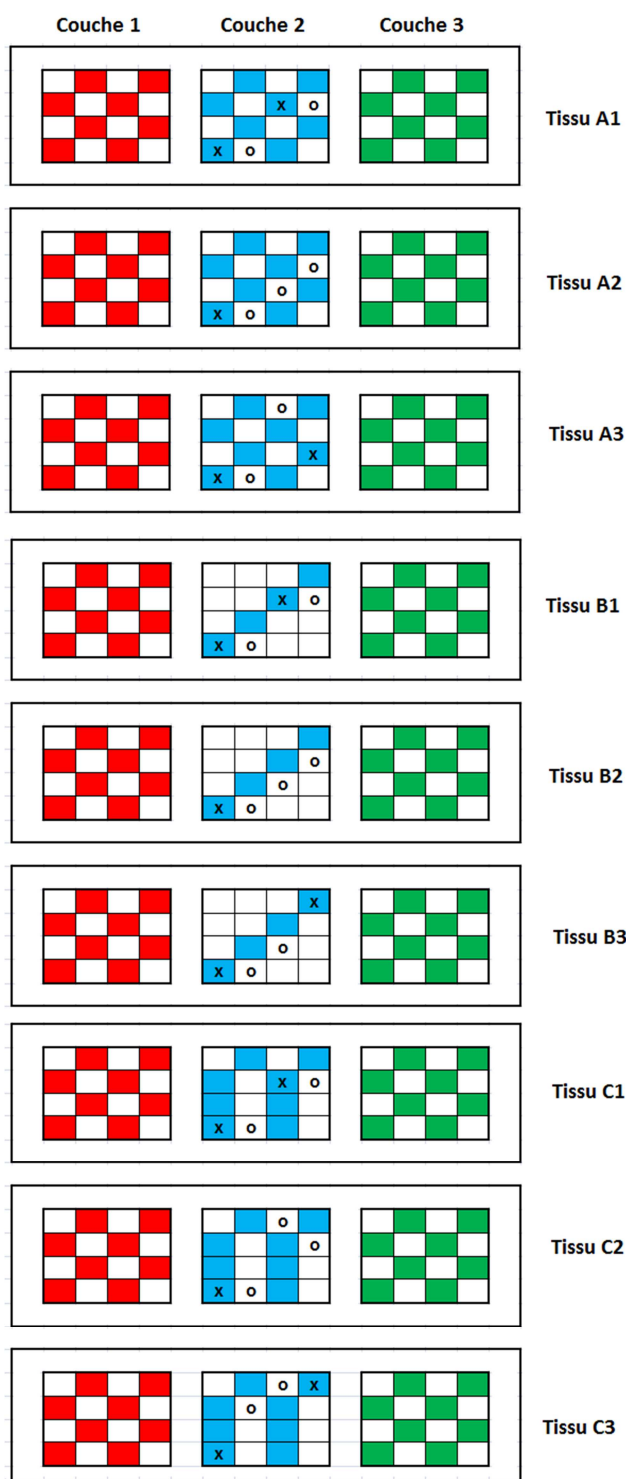


Figure 5. 24: Les armures définitives

# **CHAPITRE 4**

## **EXPERIMENTATION**



## 1. Introduction à la méthode des plans d'expériences

Trois tissus (A, B et C), 3 liages (L1, L2 et L3) et 3 duitages (16, 20 et 24) ont été choisis, ce qui signifie qu'en effectuant toutes les combinaisons possibles on obtiendrait 27 tissus différents.

Le nombre d'essais étant trop important, nous devons poser des limites. En effet nous avons calculé qu'effectuer tous les essais sur les 27 tissus nous prendrait environ 7 mois dans le meilleur des cas. Afin de diminuer le nombre de tissu à tester nous nous sommes tournés vers les plans d'expérience.

Donc, il est important de donner une information sur la méthode des plans d'expériences pour présenter les éléments fondamentaux de cette science et mettre en évidence son intérêt.

Cette science séduit de nombreux chercheurs, car dans les pluparts des disciplines, il est toujours exigé d'étudier un phénomène dépendant de différents paramètres.

Chercher l'influence des paramètres sur un phénomène en suivant les méthodes classique nécessite beaucoup de temps, car avec ces méthodes intuitives, il faut étudier l'influence de chaque paramètre indépendamment, ce qui nécessite des efforts très importants. Par exemple, si on souhaite étudier 5 paramètres à 4 niveaux (valeurs), il faut donc effectuer  $(5)^4 = 625$  essais.

Deux solutions sont envisageables pour éviter ce nombre important d'essais, soit on réduit le nombre de niveaux, soit on réduit le nombre de paramètres, mais il y a le risque de perdre la précision des résultats.

La méthode des plans d'expériences est une solution attractive pour résoudre ce problème, car elle suit des règles mathématiques pour extraire le maximum d'informations avec une précision optimum en effectuant un minimum d'essais, mais en plus elle permet une interprétation rapide des résultats et fourni un modèle précis du phénomène étudié, ce qui permet d'obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais [61].



Jaques GOUPY [62] a constaté que l'utilisation de la technique des plans d'expériences est au moins trois à quatre fois plus efficace que les démarches habituelles de conduite des essais.

En plus, cette méthode trouve le lien entre les paramètres « ou les facteurs  $x_i$  » avec les réponses (ou les grandeurs d'intérêt «  $y_j$  ». Donc on peut déterminer avec précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses, et d'obtenir un modèle de la réponse étudiée en fonction des variations des facteurs [63] .

Le lien entre la réponse et les facteurs peut être sous la forme d'une fonction mathématique de la forme suivante :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Il existe deux types de facteurs : facteurs continus et des facteurs discrets. Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté, la valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée «*niveau*», alors que l'espace défini par ces axes est appelé ***l'espace expérimental***. Une expérience donnée est alors représentée par un point dont les coordonnées sont définies par la définition des niveaux des facteurs.

Le ***domaine d'étude*** est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire les essais, (figure 6.1).

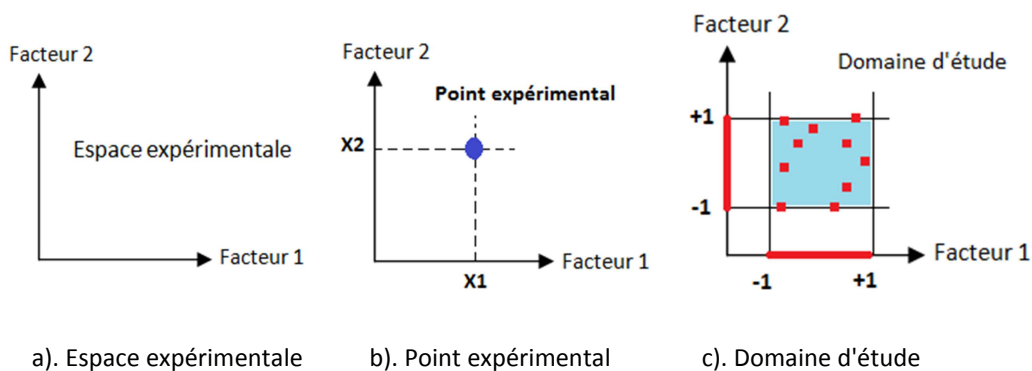


Figure 6. 1 : L'espace expérimental, le point expérimental et le domaine d'étude

Il existe de nombreux plans d'expériences comme [64] : Plans factoriels complets à deux niveaux, plans factoriels fractionnaires à deux niveaux, plans à niveaux mixtes, plans

complètes à trois niveaux, carré latin, .... etc. Pour construire un plan d'expérience, il faut que le plan soit adapté à l'étude. Par contre, on peut réaliser un plan sur mesure, s'il est impossible de trouver un plan adapté.

En utilisant les plans factoriels complets, Le nombre des essais à exécuter est égal à «  $k^x$  », où ( $x$ ) est le nombre de facteurs, et ( $k$ ) est le nombre de niveaux. Ce nombre des expériences augmente beaucoup si le nombre des facteurs est plus de 2. Par exemple, s'il y a deux facteurs «  $x=2$  » prenant chacun trois valeurs ou niveaux «  $k=3$  », il faut exécuter 9 essais, tandis que s'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 27 essais. Ce qui commence à faire beaucoup d'essais, donc pour réduire le nombre des essais, les plans fractionnaires a été introduits, noté par : «  $k^{x-1}$  », avec ces plans, on réduit le nombre des essais de 27 à 9 essais.

Les plans fractionnaires qui portent le nom de **carrés latins** sont souvent utilisés lorsque les facteurs étudiés possèdent plus de deux niveaux. Par ce plan, le modèle mathématique obtenu est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur et souvent un modèle sans répétition et sans interaction entre les facteurs.

Un autre type des plans d'expérience dit (**Plans de criblage**), est conçu pour déterminer parmi de nombreux facteurs ceux qui ont le plus d'influence significative sur la réponse étudiée.

Un plan d'expérience peut être représenté soit en forme géométrique ou en forme de tableau, mais l'utilisation de la matrice d'expérience est préférable si le nombre de facteurs est supérieur à trois (figure 6.2).

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + e$$

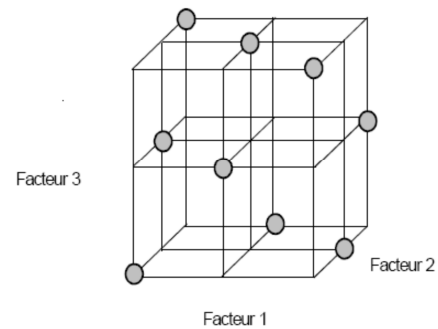
- $y$  : est la réponse
- $x_i$  : représente le niveau attribué au facteur  $i$ .
- $a_0$  : est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- $a_i$  : est l'effet du facteur  $i$ .
- $e$  : est l'écart.

N d'essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Réponse
1	+	+	-	y1
2	-	-	+	y2
3	-	+	-	y3
4	+	-	+	y4
5	-	+	-	y5
6	-	-	+	y6
7	+	+	-	y7
8	-	-	+	y8

Niveau (-)	100	rouge	petit
Niveau (+)	1000	noir	grand

Représentation en forme du tableau



La représentation géométrique

Figure 6. 2: Représentation du Plan factoriel à 3 facteurs à 2 niveaux

La bonne exploitation des plans d'expériences, nécessite de [65]:

- définir les objectifs et les réponses,
- identifier les facteurs et leurs niveaux de variations et leurs interactions,
- établir le plan d'expérience adapté au problème à résoudre,
- effectuer les essais,
- Réaliser l'analyse des résultats (analyse globale, mathématique, statistique, et graphique,
- Valider du modèle obtenu.

Il existe deux analyses complémentaires:

- L'analyse graphique : elle permet de visualiser l'influence des paramètres et de leurs interactions.
- L'analyse statistique : cette analyse complète l'analyse graphique et donne un taux de confiance statistique aux résultats. Afin que l'analyse statistique soit réalisable, les réponses étudiées doivent être de nature quantitative (continu)

## 2. Les logiciels de plan d'expériences :

Tous les logiciels de plan d'expériences possèdent des bibliothèques de plans classiques et ils permettent aussi d'établir des plans sur mesures le mieux adapté à l'étude [62]. Un exemple de ces logiciels, JMP, Minitab, Statistica, statgraphics, etc.

À l'aide d'un logiciel de plans d'expériences, on peut effectuer rapidement tous les calculs statistiques (Coefficient de détermination, écarts-types des réponses, p-value, et d'autres coefficients). Ce qui permet d'évaluer la qualité du modèle mathématique et d'effectuer les analyses de variance afin de tracer des courbes, de construire les surfaces de réponse et de déterminer les zones d'intérêt.

Ces logiciels nécessitent tous une bonne connaissance de la méthode des plans d'expériences et ne peuvent pas être utilisés sans une formation solide aux plans d'expériences.

Le logiciel JMP (John's MacIntosh product développé par le SAS Institute) est bien adapté pour la construction, l'analyse des plans d'expériences et des données expérimentales. C'est ce logiciel que nous allons utiliser pour notre étude.

### **3. Application de la méthode des plans d'expériences pour le tissu étudié:**

Nous avons, dans le paragraphe précédent, mentionné que pour exploiter la méthode des plans d'expériences de manière utile, il faut suivre une démarche précise, qui commence par la définition de l'objectif, des réponses, de l'identification des facteurs, d'établissement du plan d'expérience convenable, d'effectuer les essais nécessaires, puis de terminer par analyser des résultats obtenus et de valider le modèle mathématique obtenu.

Nous allons appliquer étape par étape cette démarche à notre étude afin de réaliser notre objectif de manière scientifique et d'extraire les bons résultats avec une précision optimale dans les meilleurs délais.

#### **3.1. Définition de l'objectif, les réponses et les facteurs:**

**Le but** de cette étude est de déterminer l'effet de plusieurs paramètres (armure, liage, duitage) sur les propriétés mécaniques et physiques d'un tissu multiple à trois couches, d'identifier ceux qui ont le plus d'influence sur les réponses observées et de définir le modèle mathématique qui détermine la relation entre ces propriétés mécaniques et les paramètres.

**Les réponses** observées dans ce travail sont les propriétés mécaniques et physiques d'un tissu triple couche. Ce sont des réponses de type continu :

- L'embuvage, le retrait, la masse surfacique, la perméabilité.
- La compression: l'énergie de compression, la résilience, la compressibilité, l'épaisseur.
- La flexion : la rigidité de flexion, le module d'Yong.
- Le cisaillement: la rigidité de cisaillement.
- La traction: la force de rupture, l'allongement maximal, l'énergie de rupture, le module d'Young.

**Le facteur** par définition : c'est une grandeur physique supposée influencer sur les variations d'une réponse. Dans cette étape, nous allons définir les facteurs qui potentiellement influent sur les propriétés mécaniques et physiques d'un tissu triple.

Comme nous avons précisé dans un précédent paragraphe que nous avons 3 tissus principaux, chaque tissu se distingue de l'autre par le tissu intermédiaire. Le liage entre les trois couches constituant le tissu se fait par les chaînes du tissu intermédiaire de trois façons différentes choisies selon la répartition des points de liage, caractérisés par l'indice de dispersion. Les 9 précédents tissus seront tissés à 3 duitages différents, ce qui produit 27 tissus différents par l'armure de la couche intermédiaire, par le liage et par le duitage. L'ensemble de ces tissus seront l'axe de notre travail. Donc on aura 3 facteurs indépendants de nature différente (l'armure de la couche moyenne, le liage, le duitage). Le tableau 3.1 permet de mieux comprendre l'identification des facteurs et leurs niveaux.

Tableau 3. 1 : Identification des facteurs

Le facteur	Type du facteur	Niveau	La valeur attribuée au niveau	
Armure du tissu	discret	A	x	Toile
		B		Sergé
		C		Cannelé
Armure de liage	continu	L1	1	Indice de dispersion
		L2	1.21	Indice de dispersion
		L3	1.32	Indice de dispersion
Duitage	continu	D1	16	Duites/cm
		D2	20	Duites/cm
		D3	24	Duites/cm

### 3.2. Construction de plan d'expérience :

L'espace expérimental est constitué de l'ensemble des combinaisons de facteurs. Dans notre cas, nous étudions 3 facteurs pourvus de 3 modalités différentes (niveaux), donc il sera composé de 27 traitements expérimentaux. La représentation schématique de cette espace est représentée à travers de la figure 6.3:

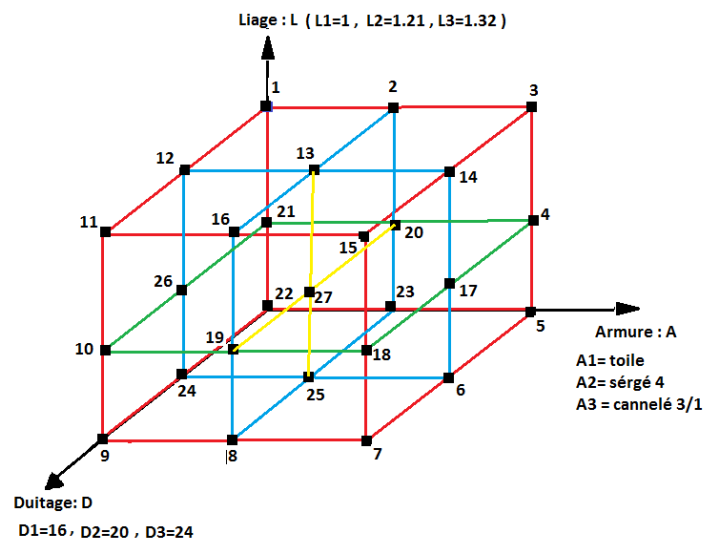


Figure 6. 3 : L'espace expérimental

En effet, nous avons calculé qu'effectuer tous les essais sur les 27 tissus afin d'obtenir les valeurs moyennes des 18 réponses, en supposant effectuer au moins 15 essais pour avoir la moyenne de chaque réponse, nous devrions réaliser au moins  $15 \times 18 \times 27 = 7290$  essais. Ce nombre d'essais est trop important, donc nous devons poser des limites.

Afin de diminuer le nombre de tissu à tester, nous avons choisi d'utiliser un plan factoriel fractionnaire à 3 facteurs à 3 niveaux, pour cela nous utilisons un carré latin qui nous permet de réduire le nombre de tissus à tester de 27 à 9, ce qui conduit à diminuer le nombre d'essais à effectuer de 7290 à 2430 essais.

Le tableau 3.2 montre le tableau du plan d'expérience en carré latin , sachant que Y est la réponse (une propriété mécanique),  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  les facteurs qui influencent la réponse respectivement l'armure du tissu, l'armure de liage et le duitage.

Tableau 3. 2: Le tableau du plan d'expérience carré latin

N du tissu	Facteur : X1	Facteur : X2		Facteur: X 3		Tissu retenu	Réponse
	Armure	Liage-L		Duitage-D			Y
1	A	L1	1	D1	16	A11 ou A1-16	
2	A	L2	1.21	D2	20	A22 ou A2-20	
3	A	L3	1.32	D3	24	A33 ou A3-24	
4	B	L1	1	D2	16	B12 ou B1-20	
5	B	L2	1.21	D3	20	B23 ou B2-24	
6	B	L3	1.32	D1	24	B31 ou B3-16	
7	C	L1	1	D3	16	C13 ou C1-24	
8	C	L2	1.21	D1	20	C21 ou C2-16	
9	C	L3	1.32	D2	24	C32 ou C3-20	

Pour simplifier notre étude, on va considérer qu'il n'y a pas d'interactions entre les facteurs, autrement dit l'interaction est négligeable. Nous allons chercher dans ce travail à traduire la réponse à travers d'un modèle du premier degré de la forme suivante :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot X_i$$

Dans lequel:

$Y$  : La réponse étudiée

$X$  : Le facteur

$\beta_0$  : La constante du modèle à identifier

$\beta_i$  : Les coefficients associés aux facteurs  $i$

### 3.3. Expérimentation: Propriétés physiques et mécaniques des tissus [66]

Afin de déterminer les propriétés physiques et mécaniques des tissus, nous avons effectué des mesures d'embuvage, de retrait, de masse surfacique, de perméabilité, de compression, de flexion, de cisaillement et de traction. Dans cette partie nous allons exposer l'ensemble des résultats obtenus.

#### 3.3.1 Embuvage et retrait

Pour caractériser la capacité du tissu à s'allonger hors déformation élastique du fil, il faut mesurer l'embuvage et le retrait. L'embuvage est la différence entre la longueur d'un fil de chaîne extrait du tissu et la longueur qu'il occupait dans le tissu rapportée à la longueur dans le tissu. La même mesure dans le sens trame donne le retrait.

$$\text{Embuvage : } E\% = 100 \times \frac{L_0 - L}{L_0} \qquad \text{Retrait : } R\% = 100 \times \frac{L_0 - L}{L_0}$$

Avec  $L_0$  la longueur du fil dans le tissu, et  $L$  la longueur du fil extrait du tissu.

Lors du tissage, les fils de chaîne sont extrêmement tendus pour permettre une insertion correcte des duites. Les fils vont ensuite s'arranger les uns par rapport aux autres selon l'armure et leurs caractéristiques pour trouver leur place définitive. L'embuvage et le retrait va alors nous permettre d'avoir une idée du parcours du fil dans le tissu. Ces valeurs peuvent aussi être utilisées pour calculer la masse surfacique théorique et la comparer à celle mesurée.

Les mesures d'embuvage et de retrait ont été effectués sur 20 fils / couche pour les 9 tissus (tableau1– Annexe 3). La figure 6.4 illustre l'embuvage et le retrait pour chaque couche pour les différents tissus testés.

Nous avons pensé qu'on obtiendrait des valeurs semblables pour les couches 1 et 3 car ce sont les mêmes armures mais ce n'est pas le cas. En général, l'embuvage est plus élevé sur la couche 3 et le retrait l'est sur la couche 1. Les erreurs proviennent probablement des problèmes de tension que nous avons eus sur les ensouples. Il faudrait utiliser un tomographe afin d'observer des coupes qui pourraient peut-être nous aider à comprendre le parcours des fils dans le tissu.



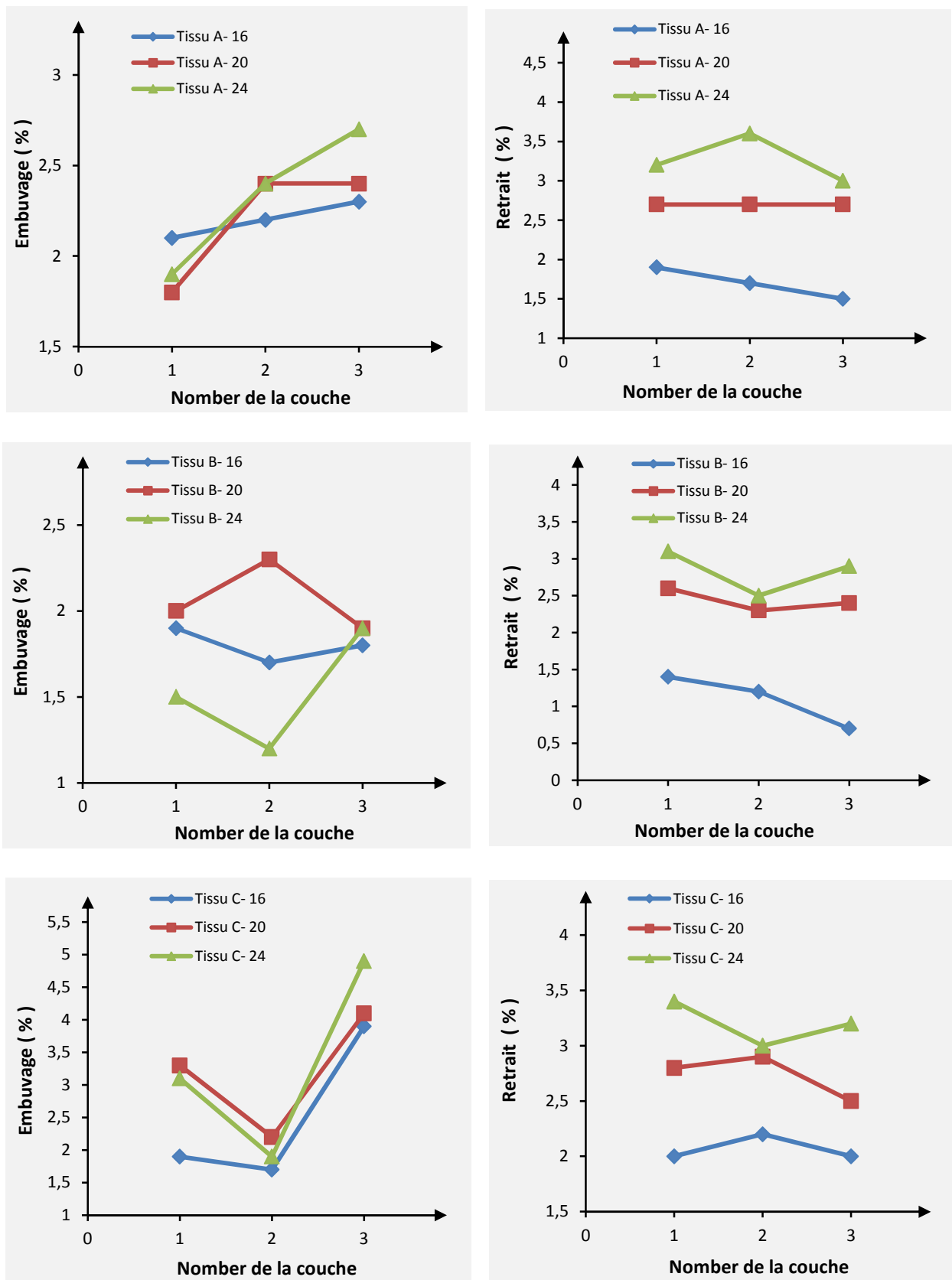


Figure 6. 4 : Les mesures d'embuvement et de retrait

### 3.3.2 Masse surfacique

La masse surfacique est directement liée à la contexture, à l’embuvage et au retrait donc il est possible de calculer une valeur théorique de la façon suivante et ainsi vérifier l’exactitude des valeurs utilisées pour ce calcul :

$$\text{Masse Surf} \left( \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right) = \text{Compte} \times 100 \times \frac{\text{Titre ch (Tex)}}{1000} \times \frac{100 + E \%}{100} + \text{Duitage} \times 100 \times \frac{\text{Titre tr (Tex)}}{1000} \times \frac{100 + R \%}{100}$$

L’autre méthode est de peser des éprouvettes de tissu et de rapporter cette masse au m<sup>2</sup>. Nous avons pesé 20 éprouvettes de chaque tissu dont les dimensions sont de 110 x 310 mm, les mesures obtenues sont montrés dans le tableau 2-annexe 3.

L’écart relatif entre les masses surfaciques mesurées et théoriques étant inférieur à 4%, valeur limite communément adoptée par les industriels du tissage. Cela confirme la validité des paramètres utilisés pour le calcul, soit le compte, le duitage, le titre de fils de chaîne et de fils de trame, l’embuvage et le retrait.

La figure 6.5 montre la relation entre la masse surfacique (mesurée et calculée) et le duitage.

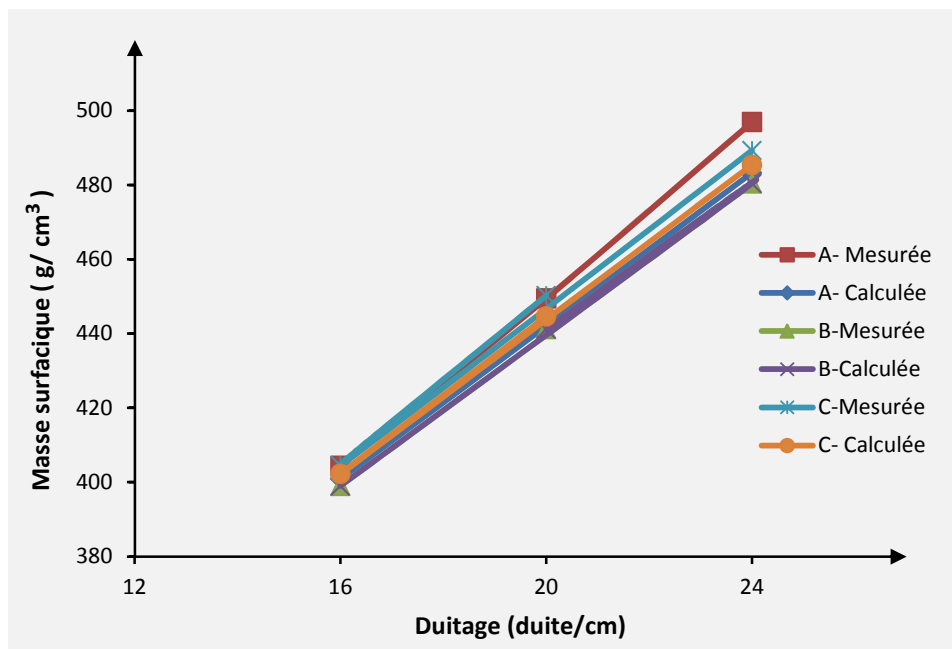


Figure 6. 5 : Masses surfaciques mesurées et calculées en fonction de duitage

On peut voir que plus le duitage est élevé, plus élevé est la masse surfacique. Les valeurs mesurées et théoriques sont presque identiques pour chaque tissu, donc on peut déduire de la superposition des différentes courbes qu'il ne semble pas y avoir de différences significatives selon l'armure et le liage utilisé.

### 3.3.3 Perméabilité

Le perméamètre permet de connaître la capacité du tissu à laisser passer l'air (figure 6.6). La perméabilité est directement liée à ses caractéristiques physiques, fil, contexture, armure. Plus le tissu sera serré, moins il sera perméable.

Pour faire les mesures nous utilisons les paramètres définis dans la norme NF G 07-111 suivante: Détermination de la perméabilité et de la porosité à l'air d'un tissu ou d'un tricot, soit une zone de test 20 cm<sup>2</sup>, une pression de 196 Pa et un résultat exprimé en l/m<sup>2</sup>/s.

La perméabilité est alors définie par le volume d'air traversant le tissu par unité de surface par unité de temps lorsqu'on crée une différence de pression de 196 Pa entre les deux faces du tissu.

Nous avons préparé des éprouvettes carrées (200 mm x 200 mm), puis réalisé les essais, les résultats sont montrés dans le tableau 3-annexe 3.



Figure 6. 6 : Air Perméability Tester FX 3300

Les mesures de perméabilité en fonction de duitage sont montrées dans la figure 6.7.

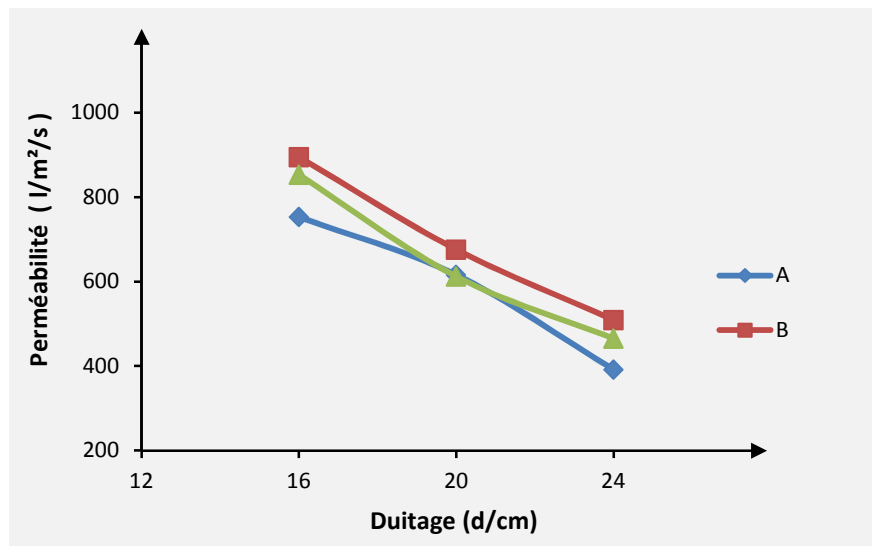


Figure 6. 7 : Les mesures Perméabilité

Les résultats confirment que la perméabilité dépend des caractéristiques physiques du tissu. Plus le duitage est élevé, plus la perméabilité est faible.

De même le tissu d'armure **B** a une perméabilité plus élevée que le tissu d'armure **C** qui est plus élevée que l'armure **A**. Cela se justifie par le fait que les fils du tissu **A** font plus de changement de face que ceux du **C** qui en font plus que ceux du **B**. Donc, l'influence de l'armure ou de **liage** peut être significative (non superposition des courbes).

Afin d'observer les changements des caractéristiques physiques des tissus après relaxation, des éprouvettes carrées (200 mm x 200 mm) ont été relaxées, 5 min à 120 °C en phase vapeur. Les variations dimensionnelles observées après relaxation au sens chaîne et au sens trame sont montrées dans le tableau 3.3

On constate que pour tous les tissus, les variations sont supérieures en chaîne à cause des fortes tensions subies par ces fils lors du tissage.

Tableau 3. 3 : Variation dimensionnelles après relaxation

	A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
Variation sens chaîne (%)	-15,10	-13,50	-12,60	-15,50	-13,60	-15,90	-14,50	-14,90	-14,40
Variation sens trame (%)	-8,00	-7,20	-7,50	-7,50	-8,60	-8,70	-9,00	-8,20	-8,20

D’après les variations dimensionnelles, les variations de perméabilité devraient être de l’ordre de - 7 % à - 15 %. Les résultats sont bien différents car la relaxation a probablement rétractée les fils et leur place dans le tissu (tableau 3.4). On constate que les variations de perméabilité sont de l’ordre de - 5 % à - 30 %, soit deux fois de plus que les variations dimensionnelles.

Tableau 3. 4 : Perméabilité après relaxation

	A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
<b>Perméabilité avant relaxation (l/m<sup>2</sup>/s)</b>	753	616	392	676	509	895	465	853	612
<b>Perméabilité après relaxation (l/m<sup>2</sup>/s)</b>	613	493	297	602	372	852	326	803	519
<b>Variation (%)</b>	-18,6	-20	-24,2	-10,9	-27	-4,8	-29,8	-5,8	-15,2

### 3.3.4 Test de compression – épaisseur

Pour ces tests il faut utiliser le module KES-FB3 de la chaîne Kawabata, il effectue un cycle de compression/relaxation nous permettant ainsi d’observer le comportement de l’échantillon sous faible contrainte. La difficulté est de savoir à quel moment on obtient l’épaisseur réelle du tissu.

Il y a 3 phases lors de la compression du tissu, la première consiste à comprimer les fibres qui dépassent de la surface de tissu, la pression nécessaire est de 500 Pa, c’est à ce moment que l’épaisseur est relevée, ensuite la compression va évacuer l’air présent dans les fils et les pores du tissu, la résistance est due aux frottements entre les fils lors de la réorganisation de la structure.

La dernière phase est la compression des fibres sur elles-mêmes. L’hystérésis entre les courbes de compression et de décompression est due aux frottements inter-fils et inter-filaments.

Vingt essais ont été effectués sur chaque tissu et le logiciel nous fournit la courbe de pression en fonction de l’épaisseur (figure 6.8) et calcule l’énergie de compression, la résilience, la compressibilité et l’épaisseur (tableau 4- annexe 3).

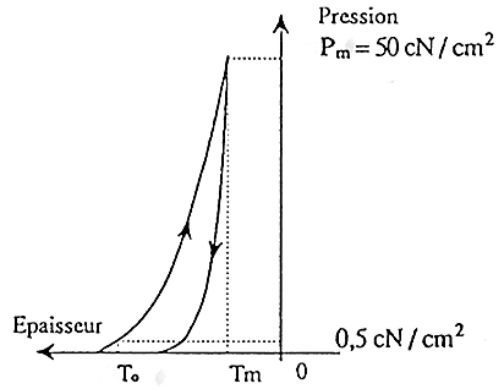
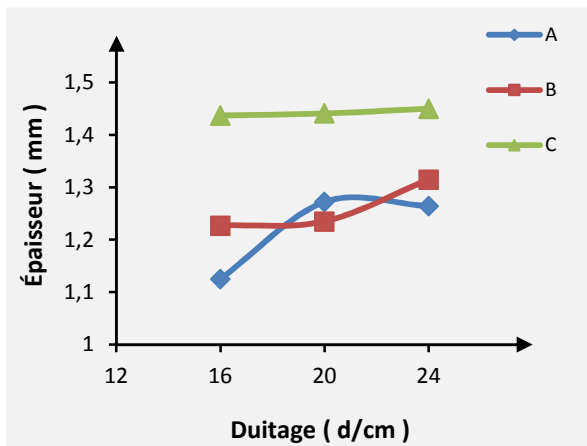
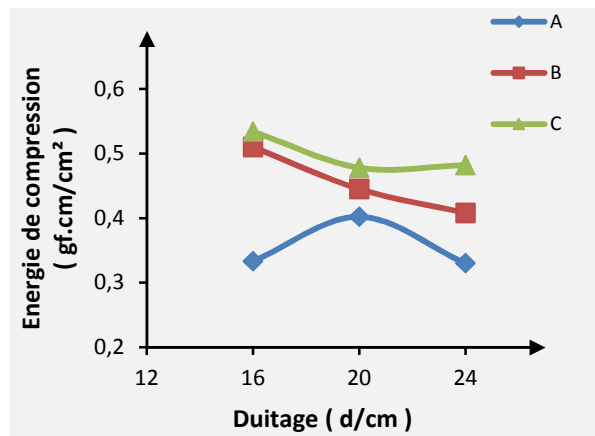


Figure 6. 8 : Courbe de pression

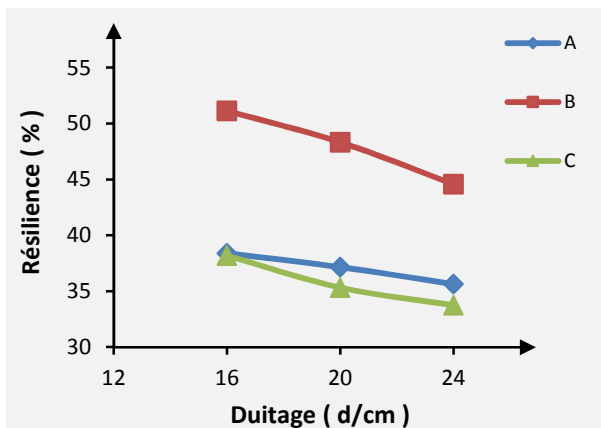
La figure 6.9 illustre l'énergie de compression, la résilience, la compressibilité et l'épaisseur en fonction de duitage pour les tissus A, B et C.



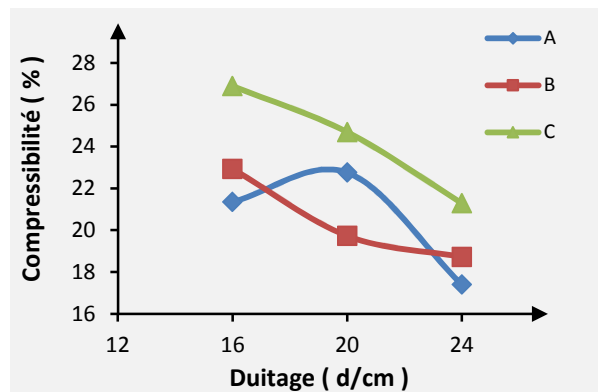
(a) : Courbe de l'épaisseur



(b) : Courbe de l'énergie de compression



(c) : Courbe de la résilience



(d) : Courbe de la compressibilité

Figure 6. 9 : Test de compression

De la figure 6.9 (a, b, c et d) , on peut voir que les tissus avec l’armure C sont plus épais, l’entrelacement (l’armure où le liage) a donc une influence sur l’épaisseur mais aussi sur l’énergie de compression. La résilience et la compressibilité semblent dépendre du duitage et d’autres paramètres (liage ou armure). Cependant, pour mieux savoir le taux d’influence de chaque paramètre, il faudra regarder les résultats des analyses statistiques.

Nous avons vu précédemment que les dimensions des éprouvettes ont diminués après relaxation donc nous avons observé l’épaisseur sur 5 éprouvettes, les mesures sont enregistrées dans le tableau 3.5.

Tableau 3. 5: Épaisseur après relaxation

	A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
Épaisseur avant relaxation (mm)	1,125	1,272	1,246	1,235	1,315	1,227	1,450	1,437	1,441
Épaisseur après relaxation (mm)	1,409	1,389	1,368	1,448	1,482	1,481	1,535	1,462	1,474
Variation (%)	25,32	9,19	8,27	17,20	12,74	20,67	5,85	1,70	2,31

### 3.3.5 Test de flexion

La flexibilité pour un renfort de composite est une des propriétés les plus importantes avec le cisaillement, permettant au tissu de suivre les formes d’un moule plus ou moins complexe. Les tests généralement pratiqués sur les tissus pour évaluer la capacité du tissu à résister à la déformation lorsqu’il subit une sollicitation de flexion sont :

- **Le KES FB2, module de flexion de Kawabata** : Cet appareil enregistre le moment de flexion en fonction de la courbure lors d’un cycle. On peut donc dans ce cas observer le comportement non linéaire du tissu en flexion. Cependant ayant été développé pour l’habillement, il n’est pas adapté aux textiles techniques car on dépasse la capacité du capteur.
- **Le test du cantilever aussi appelé la méthode coulissante** [67]–[69]: Cette méthode a été développé par Peirce[70] en 1930. Il a créé un flexomètre permettant de calculer la rigidité de flexion (figure 6.10). Une éprouvette rectangulaire est maintenue entre une plate-forme et une glissière graduée. Il faut avancer progressivement cette glissière

jusqu'à ce que l'extrémité du tissu (longueur L) touche le plan incliné à  $\theta = 41,5^\circ$ , l'éprouvette fléchit sous son propre poids. La condition d'équilibre est exprimée par la loi de Hooke, qui va nous permettre de calculer la rigidité de flexion B(N.m) et le module d'Young E (Pa) [71]–[73] :

$$E.I = M.\rho = B.b$$

Avec  $I (m^4) = \frac{b h^3}{12}$  le moment d'inertie par rapport à l'axe neutre, M (N.m) le moment de flexion,  $\rho$  (m) le rayon de courbure, b (m) la largeur du tissu et h (m) l'épaisseur du tissu.

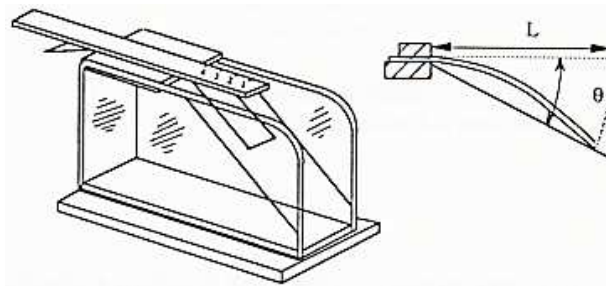


Figure 6. 10 : Principe du cantilever [67]

Peirce a ensuite défini le ratio  $S = \frac{B}{w} = \frac{L^3}{8 \operatorname{tg} \theta}$  car la flèche  $v = \frac{-wbL^4}{8EI} = -L \operatorname{tg} \theta$  avec w le poids par unité de surface.

Cependant le textile étant un matériau très flexible et donc très déformable, Peirce a proposé un facteur de correction,  $\cos \theta/2$ , basé sur des données expérimentales afin de diminuer S.

$$\rightarrow S = \frac{L^3}{8} = \left(\frac{L}{2}\right)^3 \quad \text{car avec } \theta = 41,5^\circ, \cos \frac{\theta}{2} = \operatorname{tg} \theta$$

On définit alors la longueur de flexion par  $c = \frac{L}{2}$ , donc  $B = w c^3$  et  $E = \frac{12 B}{h^3}$

Pour ces tests nous ne pouvons pas utiliser le flexomètre du laboratoire de métrologie car la largeur de celui-ci est de 25 mm, ce qui n'est pas suffisant dans notre cas. En effet il faut au moins 10 motifs d'armure pour que l'éprouvette soit significative. Le plus gros motif sera pour le duitage 16, un motif = 12 fils = 0,75 cm il faut donc que les



éprouvettes fassent au moins 7,5 cm de largeur. Nous avons fabriqué un nouveau flexomètre afin de pouvoir les tester (figure 6.11).



Figure 6. 11 : Le flexomètre fabriqué

Afin d'effectuer les mesures les plus précises possibles, nous avons filmé les essais de flexion. Le lecteur multimédia VLC (VideoLAN Client multimedia player est un lecteur, un encodeur et un diffuseur multimédia) nous a ensuite permis d'extraire l'image de l'instant où le tissu touche le plan incliné. Puis avec **Image J** (logiciel libre d'analyse d'image développé par le National Institute of Health) nous avons pu mesurer précisément la longueur de flexion (figure 6.12). Ceci permet ensuite de calculer le module d'Young et la rigidité de flexion (tableau 5- annexe 3).

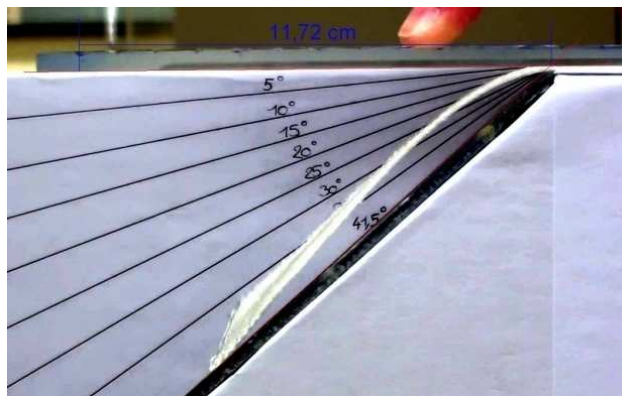


Figure 6. 12 : Mesure de la longueur de flexion

Nous avons tracé les courbes de rigidité et module d'Young en fonction du duitage (figures 6.13 et 6.14), les résultats permettent de dire que la rigidité de flexion et le module d'Young augmentent avec le duitage. Cependant, l'influence du duitage est moins importante dans le sens trame que dans le sens chaîne.

On peut noter aussi que les tissus A sont les plus rigides que les tissus B qui sont les plus rigides que les tissus C, donc l'armure et le **liage** ont une influence sur la flexion.

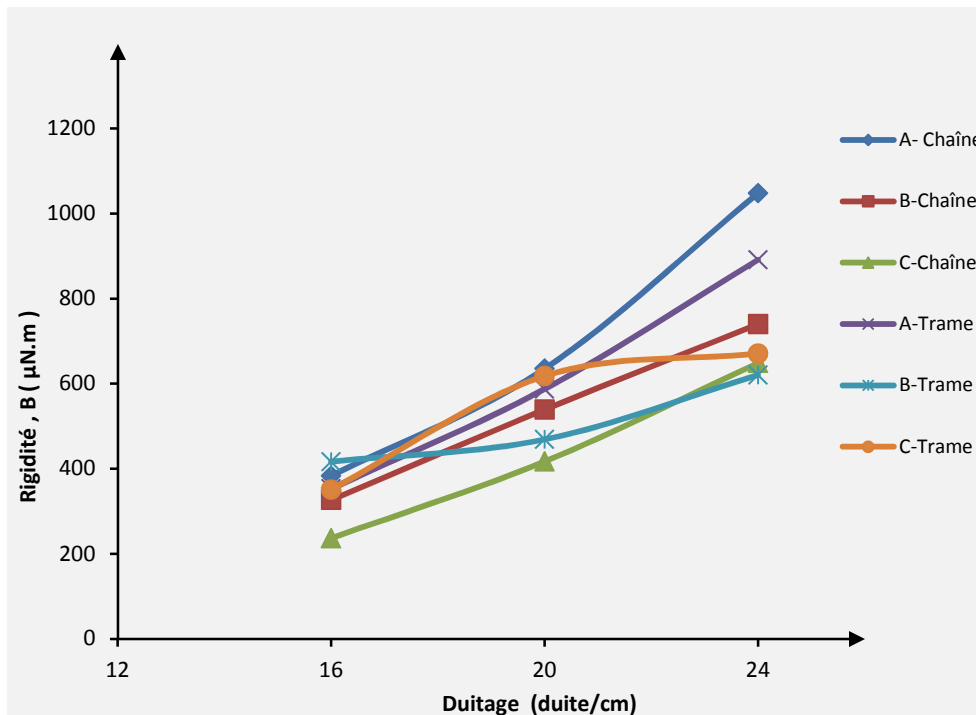


Figure 6. 13 : La rigidité en fonction du duitage

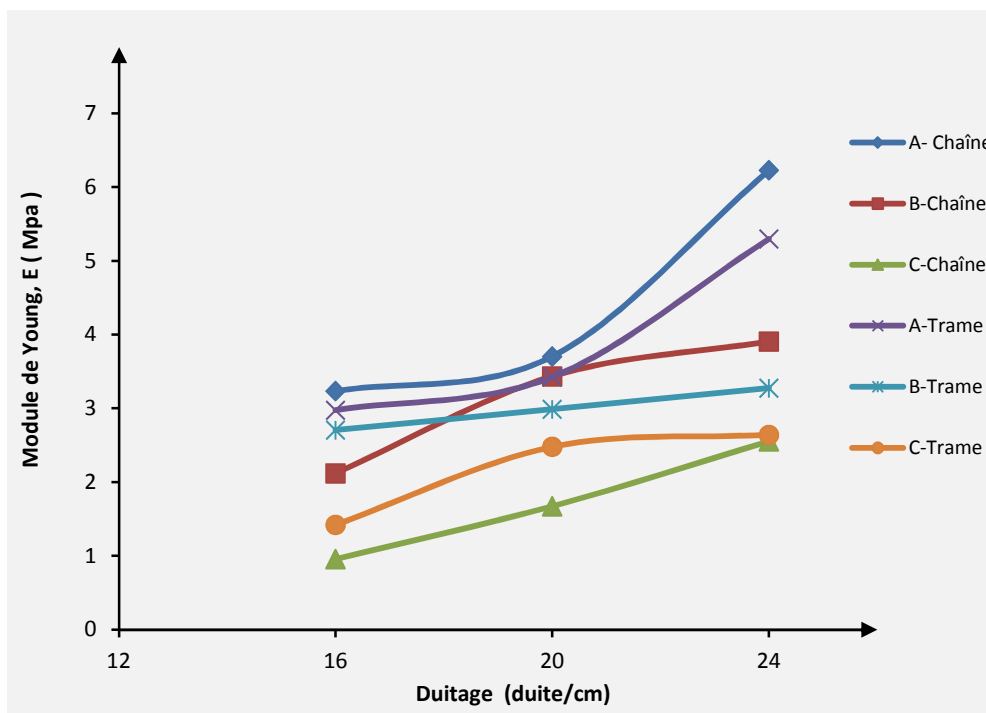


Figure 6. 14 : Module d'Young en fonction du duitage

### 3.3.6 Test de cisaillement

La capacité d'un tissu à cisailer est une des propriétés mécaniques les plus intéressantes, elle permet au tissu de pouvoir suivre des moules de forme complexe. Le comportement en cisaillement est directement lié à la structure de celui-ci, si le duitage est très élevé et si le nombre de changement de couche des fils est élevé alors l'angle de blocage sera faible (rapidement observable). Lors d'un test de cisaillement sur tissu, on peut observer 3 phases correspondant à 3 comportements. Au début les fils de chaîne et trame tournent sans opposer de résistance ensuite lorsque l'angle augmente, les espaces inter-fils diminuent ce qui augmente les contacts et donc la résistance. Dans la dernière partie les pores sont fermés et on peut observer une compression latérale des fils.

Il existe deux types de cisaillement, le cisaillement pur et le cisaillement simple [67], [74] .

#### 3.3.6.1 Le cisaillement pur :

Le cisaillement pur se produit lorsqu'une éprouvette subit une traction à 45° du sens des fils (chaîne et trame) et garde la même surface mais pas le même angle  $\theta$ . Pendant ces tests les fils vont pivoter autour de leur point de liage. Les deux méthodes permettant d'observer un cisaillement pur sont :

**1. Le bias extension test** : Comme pour les tests de traction, l'éprouvette est fixée par deux pinces, l'une fixe et l'autre se déplaçant à vitesse constante, l'éprouvette est rectangulaire orientée à 45° des fils de chaîne et de trame. Nous avons choisi un ratio de 3, soit un rectangle de 100 x 300 mm permettant d'observer une zone de déformation uniforme [75], [76]. Comme nous pouvons le voir sur la figure 6.15, trois zones différentes apparaissent :

- La zone **A** : Cisaillement pur avec un angle de cisaillement de  $\phi = \pi/2 - \theta$ ,
- La zone **B**: Cisaillement avec un angle de  $\phi/2$ ,
- La zone **C**: pas de cisaillement.

Il faut utiliser un corrélateur d'image afin d'observer le comportement du tissu et d'étudier l'angle de cisaillement en fonction de la force appliquée. N'ayant pas de corrélateur

d'image nous traçons la courbe force de cisaillement normalisée en fonction de l'angle de cisaillement à l'aide des formules suivantes [68], [77] :

$$\phi = \frac{\pi}{2} - 2 \cos^{-1} \frac{L+d}{\sqrt{2}d} ,$$

Cette expression permet d'obtenir l'angle de cisaillement en fonction de L (avec L = H (longueur initiale de l'éprouvette) - W (largeur)) la longueur de la zone A et de d le déplacement de la pince.

Lors de la traction, l'énergie est dissipée dans les zones A et B :

$$F \cdot \dot{d} = C_s(\varphi) \cdot A_A \cdot \dot{\varphi} + C_s\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot A_B \cdot \frac{\dot{\varphi}}{2}$$

Avec A l'aire de la zone et  $C_s(\varphi) = F_{sh}(\varphi) \cdot \cos \varphi$  le couple par unité de surface nécessaire à déformer la zone en cisaillement.

$$\begin{aligned} \rightarrow C_s(\varphi) &= \frac{1}{2H-3W} \left( \frac{\sqrt{2}}{W} (H-W)F \sin \theta - W \cdot C_s\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right) \\ &\text{car } A_A = \frac{2HW-3W^2}{2}, A_B = W^2 \text{ et } \dot{\varphi} = \frac{\sqrt{2}}{L \sin \theta} \dot{d} \\ \rightarrow C_s(\varphi) &= \frac{1}{2H-3W} \left( \left(\frac{H}{W} - 1\right) F \left( \cos \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{\varphi}{2} \right) - W \cdot C_s\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right) \\ \rightarrow \\ F_{sh}(\varphi) &= \frac{1}{(2H-3W) \cos \varphi} \left( \left(\frac{H}{W} - 1\right) F \left( \cos \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{\varphi}{2} \right) - W \cdot F_{sh}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos \frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned}$$

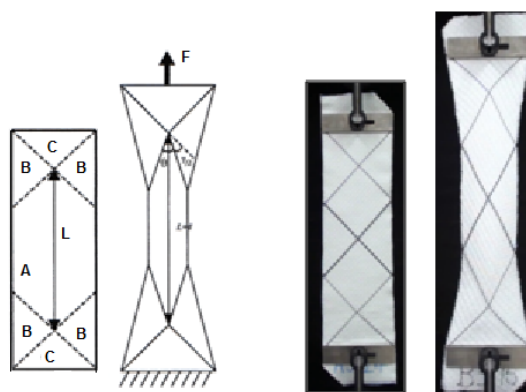


Figure 6. 15 : Bias Extension Test [78]

**2. Le Picture Frame Test** [68], [74] : une éprouvette de forme carrée est placée dans un cadre métallique articulé aux quatre coins (figure 6.16). Un des coins du cadre est fixe et le coin opposé est mobile. L'angle entre les fils du tissu va donc diminuer au cours de l'essai, il va se produire un phénomène de cisaillement uniforme sur toute la surface. Le laboratoire ne disposant pas de ce matériel, nous n'avons pas effectué ce test.

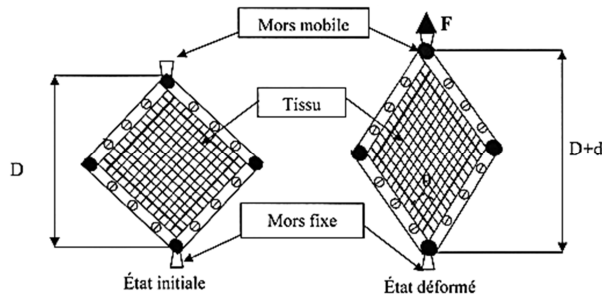


Figure 6. 16 : Picture Frame Test [74]

### 3.3.6.2 Cisaillement simple :

Le cisaillement simple se produit lorsqu'un côté d'une éprouvette carrée ou rectangulaire se déplace parallèlement au côté opposé. Pour effectuer ce genre de test il faut utiliser :

**Le KES FB1, module de traction et cisaillement de Kawabata** : Une pince est fixe et l'autre se déplace à vitesse constante afin de cisailer le tissu (figure 6.17). Cet appareil est principalement utilisé pour tester des étoffes destinées à l'habillement, ce qui est un inconvénient pour nous car il a une limite maximum à  $8^\circ$ .

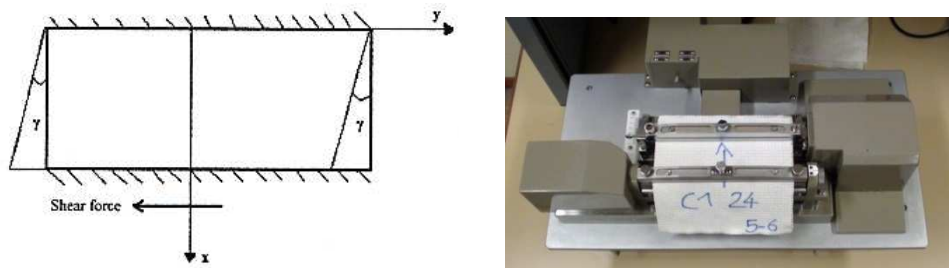


Figure 6. 17 : Cisaillement simple, KES FB1 de Kawabata

Pour le test Kawabata, une éprouvette de 20 x 20 cm est fixée par deux pinces parallèles espacées de 5 cm et pour le bias extension test, une éprouvette 10 x 40 cm est fixée par deux pinces espacées de 30 cm. La rigidité de cisaillement est mesurée entre 0,5 et 5° de cisaillement, c'est la pente de la courbe force de cisaillement normalisé en fonction de l'angle de cisaillement, c'est la pente de la courbe force de cisaillement normalisé en fonction de l'angle (figures 6.18 et 6.19).

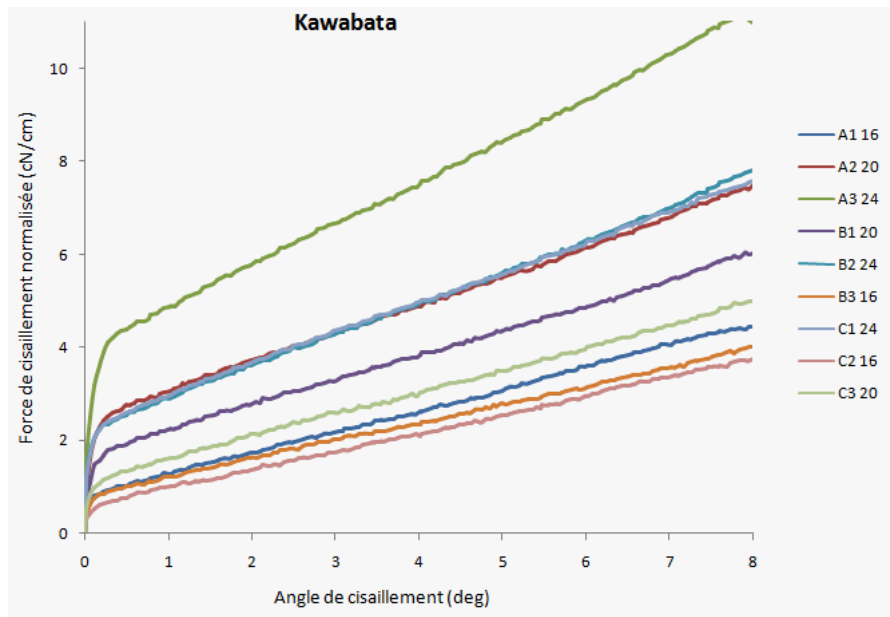


Figure 6. 18 : Comportement des tissus en cisaillement (angle faible)- Kawabata

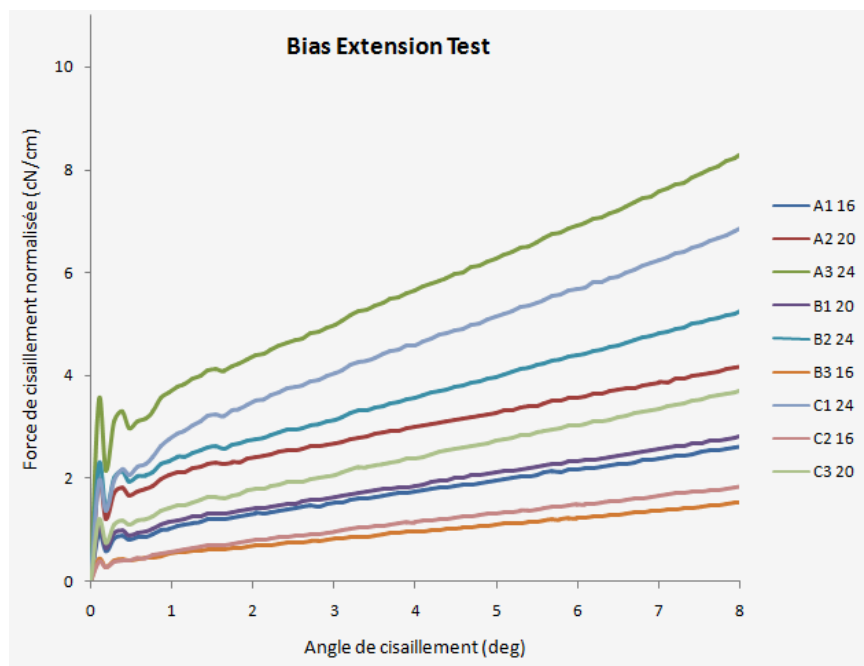


Figure 6. 19 : Comportement des tissus en cisaillement (angle faible)-Bias Extension Test

À partir des résultats obtenus (tableau 6. annexe 3), nous avons tracé les courbes de la rigidité de cisaillement en fonction de duitage pour les deux tests (Kawabata et Bias extension test, figure 6.20). Nous avons trouvé que la rigidité de cisaillement dépend du duitage des tissus alors que l'influence des autres paramètres n'est pas évidente. Nous pouvons voir que les valeurs sont assez faibles, cela se justifie par le fait que les essais ont été réalisés à faible angle de cisaillement. Les différences entre les résultats du test Kawabata et du test en biais proviennent probablement du fait que sur le KES-FB1 les fils sont maintenus par des pinces alors que dans le cas du bias extension test, dans la zone de mesure les fils sont complètement libres. Les valeurs de CV% sont très élevées dans le cas du second test car les essais n'ont été effectués que sur 5 éprouvettes contrairement aux Kawabata où 10 éprouvettes ont été utilisées.

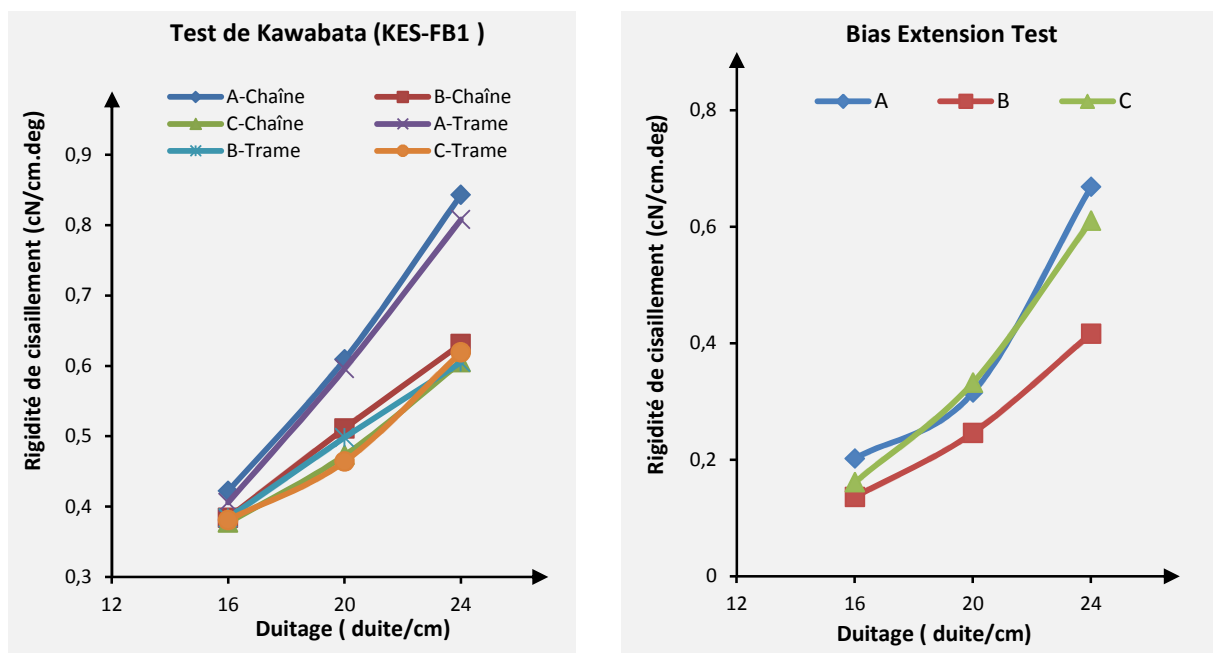


Figure 6. 20 : La rigidité de cisaillement en fonction du duitage

Lors des tests effectués sur le KES-FB1, nous n'avons pas observé de flambage (formation des plis) ce qui signifie que le tissu n'est pas très serré, la saturation n'a pas été atteinte. Les tests en biais permettant de tester jusqu'à un angle de cisaillement plus important, ils ont permis d'observer le comportement jusqu'à 70° et aussi de relever l'angle de blocage – l'angle auquel le premier pli apparait (figure 6.21).

Nous avons relevé les valeurs d'angle de blocage (tableau 7. annexe 3), ces valeurs sont approximatives car elles ont été relevées à l'œil nu mais elles nous permettent d'avoir un ordre d'idée et de voir qu'elles dépendent du duitage et de l'armure. Plus le duitage est élevé, plus les angles de blocage sont faibles, plus il y a de changements de couche plus elles sont faibles, (figure 6.22).

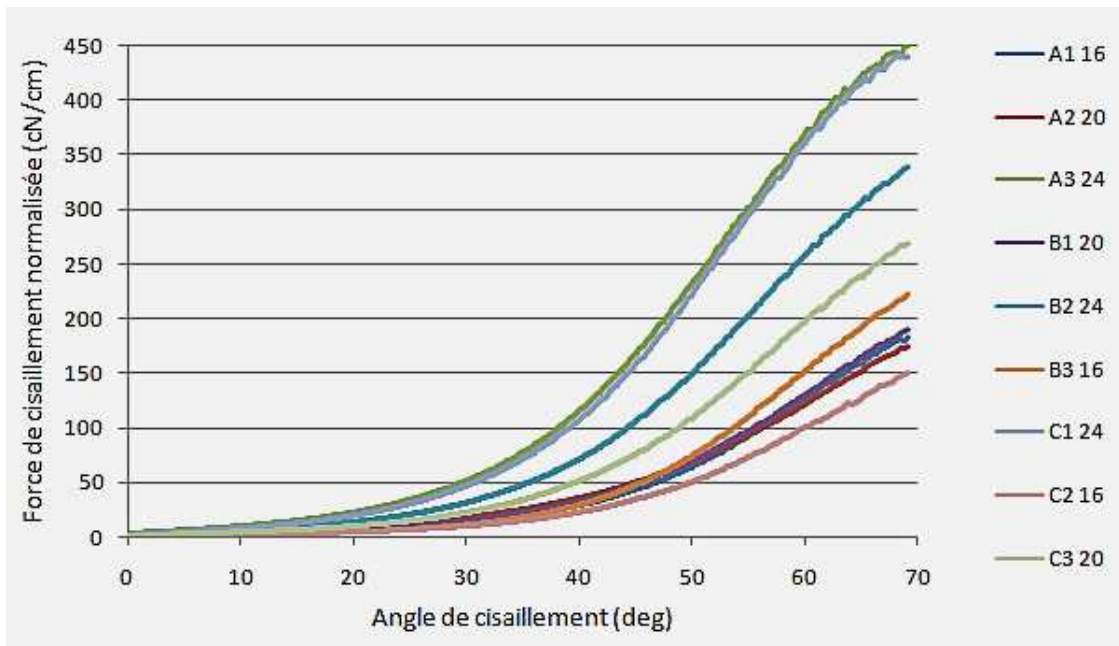


Figure 6. 21 : Comportement des tissus en cisaillement

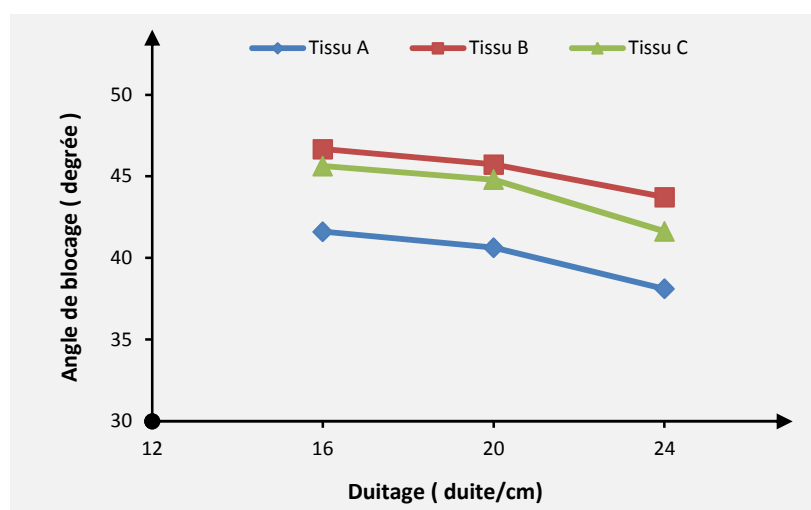


Figure 6. 22 : Angle de blocage



### 3.3.7 Test de traction

Pour évaluer la résistance du tissu il est important d'effectuer une étude dynamométrique. Pour cela il faut placer entre deux pinces une éprouvette rectangulaire, une pince est fixe, l'autre est mobile et se déplace à vitesse constante afin d'appliquer une force de traction sur le tissu. La cellule de mesure transfère les données à l'ordinateur qui nous fournit ensuite une courbe force en fonction de l'allongement sur laquelle nous pouvons relever ou calculer la force de rupture, la contrainte de rupture, la déformation maximum, l'énergie nécessaire à la rupture et le module d'Young.

Afin de limiter les phénomènes de striction nous n'avons pas choisi d'utiliser les dimensions prévues par la norme mais plutôt 100x300 mm en sens chaîne et en sens trame, soit 200mm entre les pinces.

Nous avons commencé les essais sur le dynamomètre MST 20 M avec la cellule de mesure de 100kN et les pinces pneumatiques. Les premiers tests n'ont pas été concluants, nous ne parvenions pas à avoir une déchirure correcte (les fils verticaux sortaient et les fils horizontaux restaient à l'intérieur des mors). Pour éviter ces problèmes, plusieurs solutions ont été envisagées :

- des caoutchoucs, sans succès car le tissu glissait.
- des pinces à cabestan, impossible en sens trame car la laize du tissu est de 32 cm.
- des talons en néoprène, solution que nous avons retenue mais nous avons dû faire face à un autre problème. La charge maximum supportée par les pinces est de 5kN alors que la force de rupture du tissu testé est de 13kN
- Ne pouvant pas effectuer les essais dans notre laboratoire, nous avons effectué les tests à l'entreprise COBRA Europe spécialiste dans la fabrication de bandes transporteuses pour les faire sur leur dynamomètre **LLOYD LR 100K** (figure 6.23). Nous avons mis des caoutchoucs afin de réduire suffisamment les contraintes au niveau des mors et cette fois les essais ont été concluants.



Figure 6. 23 : Dynamomètre LLOYD LR 100K de chez COBRA

Les résultats obtenus sont enregistrés dans le tableau 8, annexe 3, puis nous avons tracé tous les courbes en fonction de duitage (la force de rupture, l'allongement maximale, l'énergie et le module d'Young), (figures 6.24 à 6.27).

Nous avons constaté que la force de rupture en sens trame dépend principalement du duitage alors que l'énergie, l'allongement, le module d'Young et la force de rupture en sens chaîne semblent être liés à l'armure.

Les résultats obtenus lors des différents tests nous permettent de faire des suppositions sur quel paramètre du tissu semble avoir le plus d'impact sur les propriétés physiques et mécaniques mais cela ne nous permet pas de faire des hypothèses sur les valeurs que les tissus non testés auraient obtenu.

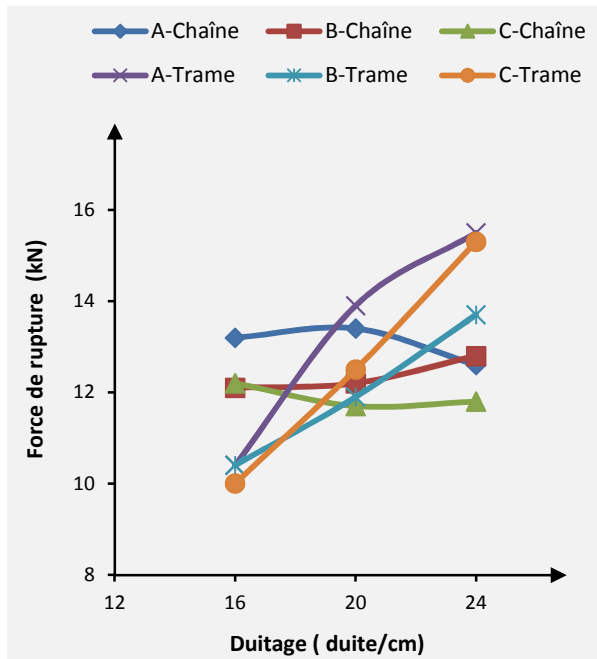


Figure 6. 24 : La force de rupture

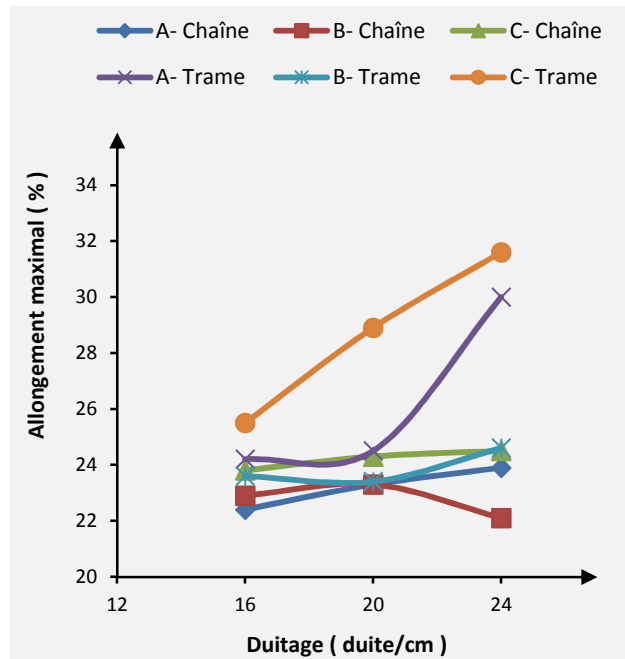


Figure 6. 25 : Allongement maximale

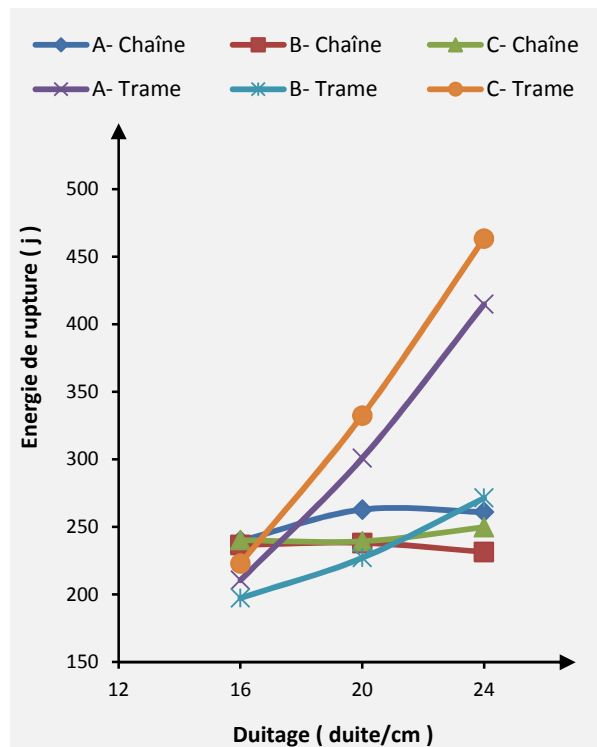


Figure 6. 26 : Énergie de rupture

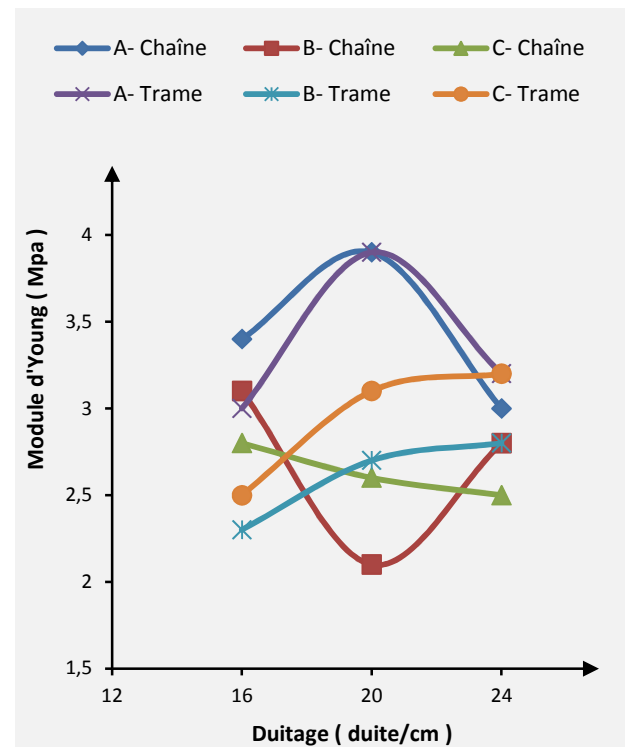


Figure 6. 27 : Module d'Young

### 3.4. Analyse statistique

Pour cette partie nous avons utilisé le logiciel JMP 6 (John's MacIntosh Product développé par le SAS Institute), c'est un logiciel de statistiques qui a l'avantage d'avoir une partie consacrée à la construction des plans d'expériences. Il nous a permis de faire une analyse en composantes principales et des analyses de variances donnant ainsi le poids des paramètres et les modèles statistiques régissant les réponses [79]–[83], (figure A3.1, annexe 3).

#### 3.4.1 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales transforme les résultats de façon à pouvoir les visualiser [84]. À partir d'un tableau à 9 lignes représentant les tissus et 28 colonnes représentant les résultats, le logiciel va rechercher des composantes principales (CP). La première étant une combinaison linéaire des variables d'origine avec une variance maximum.

Cette combinaison est extraite des corrélations les plus importantes du tableau de corrélation, (figure A3.2, Annexe 3) et représente le groupe de variables les plus liées entre elles, la deuxième CP est orthogonale à la première avec une variance maximum mais inférieure à la première et ainsi de suite.

Il faut maintenant choisir le nombre de CP qui constitueront les plans sur lesquels seront projetés les produits (tissus) et les variables (résultats). Le choix se fait de la façon suivante :

- Ne pas prendre les CP dont la valeur propre est inférieur à 1.
- Conserver les valeurs propres VP alignées linéairement sur l'histogramme, (figure 6.28).
- Prendre environ 80 % de l'inertie total.

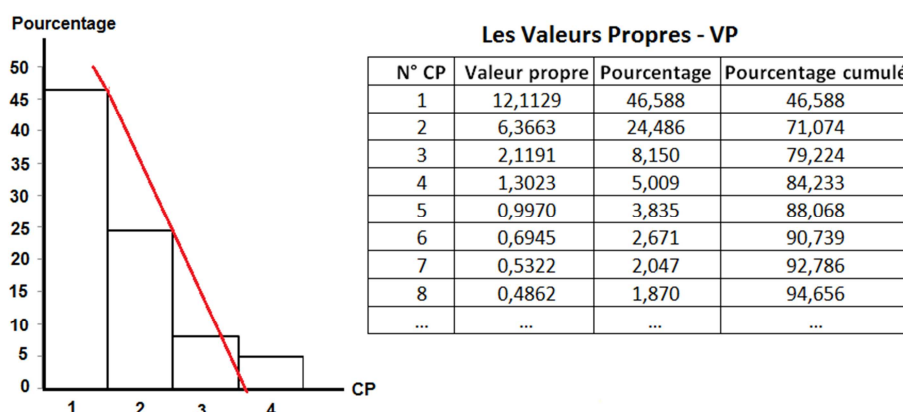


Figure 6. 28 : Histogramme des VP

Pour l’analyse nous avons choisi de garder 3 CP, les variables sont représentées sur ces 3 axes dans les cercles de corrélations, appelés «graphiques des loadings» sur JMP (figure 6.29). Si une variable est très éloignée du centre du cercle (proche du cercle) cela signifie qu’elle est mieux représentée dans ce plan que dans un autre.

D’après la position des points sur les cercles, on peut voir que l’embuvage couche 1 et 3, l’énergie de compression, la compressibilité, la résilience, l’allongement max en sens trame, l’énergie de rupture en sens trame, la retrait couche 1, 2 et 3, la rigidité de cisaillement en sens chaîne et trame, la rigidité de flexion en sens chaîne et le module d’Young en sens chaîne et trame (d’après les tests de flexion) sont très bien représentés dans le plan CP1/CP2. Alors que la perméabilité, la masse surfacique, l’embuvage couche 2, l’énergie de rupture en sens chaîne, le module d’Young en sens trame (d’après les tests de traction), la variation dimensionnelle après relaxation en sens chaîne et la force de rupture en sens trame sont le mieux dans le plan CP1/ CP3 et la force de rupture en sens chaîne, la variation dimensionnelle après relaxation en sens trame, le module d’Young en sens chaîne (d’après les tests de traction), l’allongement max en sens chaîne et l’épaisseur dans le plan CP2/CP3.

Les cercles de corrélations affinés vont nous permettre d’interpréter les axes des cartes des produits, appelées graphiques des scores sur JMP et ainsi d’en construire de nouvelles (figure 6.30). Les cartes des produits originales (figure 6.31) positionnent les tissus dans les plans constitués des CP 1, 2 et 3 mais elles ne sont pas interprétables seules.

Ces cartes des produits permettent d'illustrer les conclusions tirés des résultats des tests mécaniques et de les compléter. Les résultats représentés dans le plan 1-3 dépendent du duitage car les tissus sont regroupés selon le duitage mais ils sont aussi organisés selon l'armure, dans le cadre 2-3 les résultats dépendent de l'armure et dans le cadre 1-2 les tissus semblent être regroupés par duitage et armure.

Les tissus C ont des valeurs de compressibilité, d'énergie de compression, d'embuvage (couche 1 et 3), d'énergie nécessaire à la rupture en sens trame, d'allongement maximum en sens trame et chaîne et d'épaisseur supérieures aux tissus A et B et des valeurs de résilience (compression), de module d'Young, de force de rupture en sens chaîne et de variation dimensionnelle après relaxation en sens trame inférieures. Un duitage élevé permet d'avoir des valeurs de rigidité de cisaillement, de rigidité de flexion, de retrait, de masse surfacique et de variation dimension en sens chaîne plus élevées. On peut remarquer sur cette figure qu'il n'y a pas de regroupement selon le liage cela signifie que ce paramètre a moins d'importance que les deux autres.

Cette méthode permet de visualiser les corrélations entre les résultats, cependant pour avoir des données chiffrées sur les poids des paramètres, il faut faire une analyse de variance

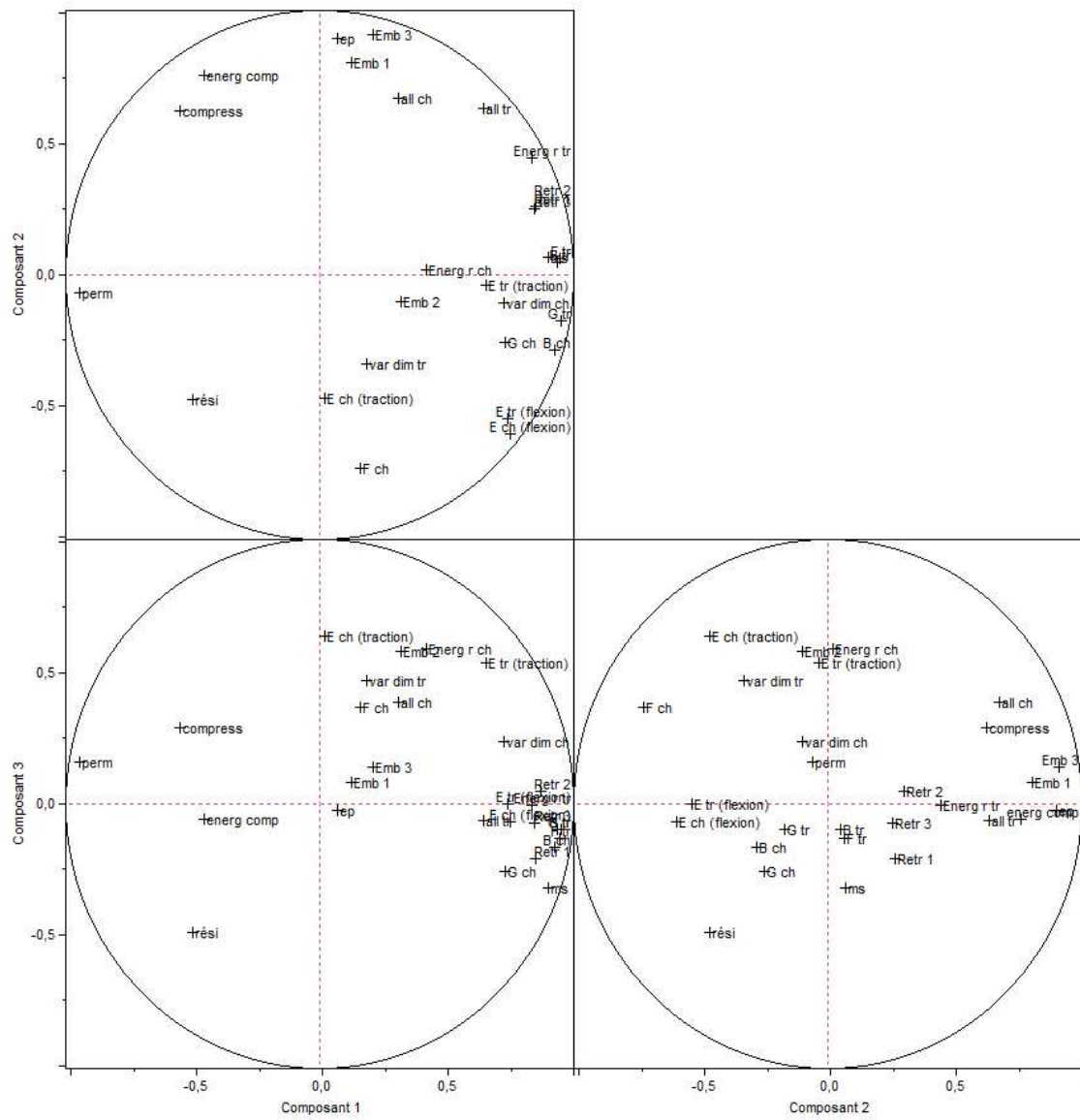


Figure 6. 29 : Cercles de corrélation

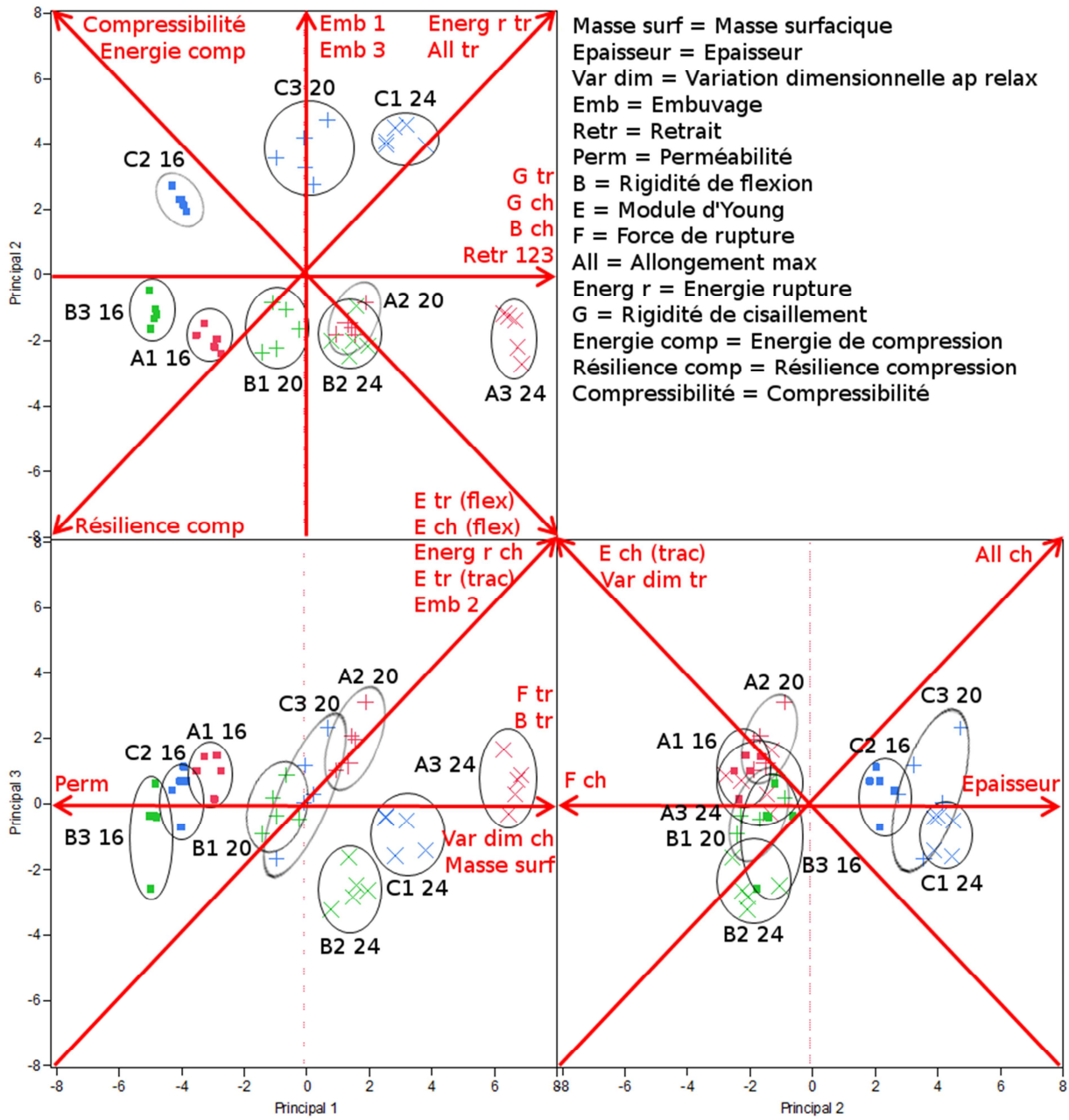


Figure 6. 30 : Interprétation des cartes des produits



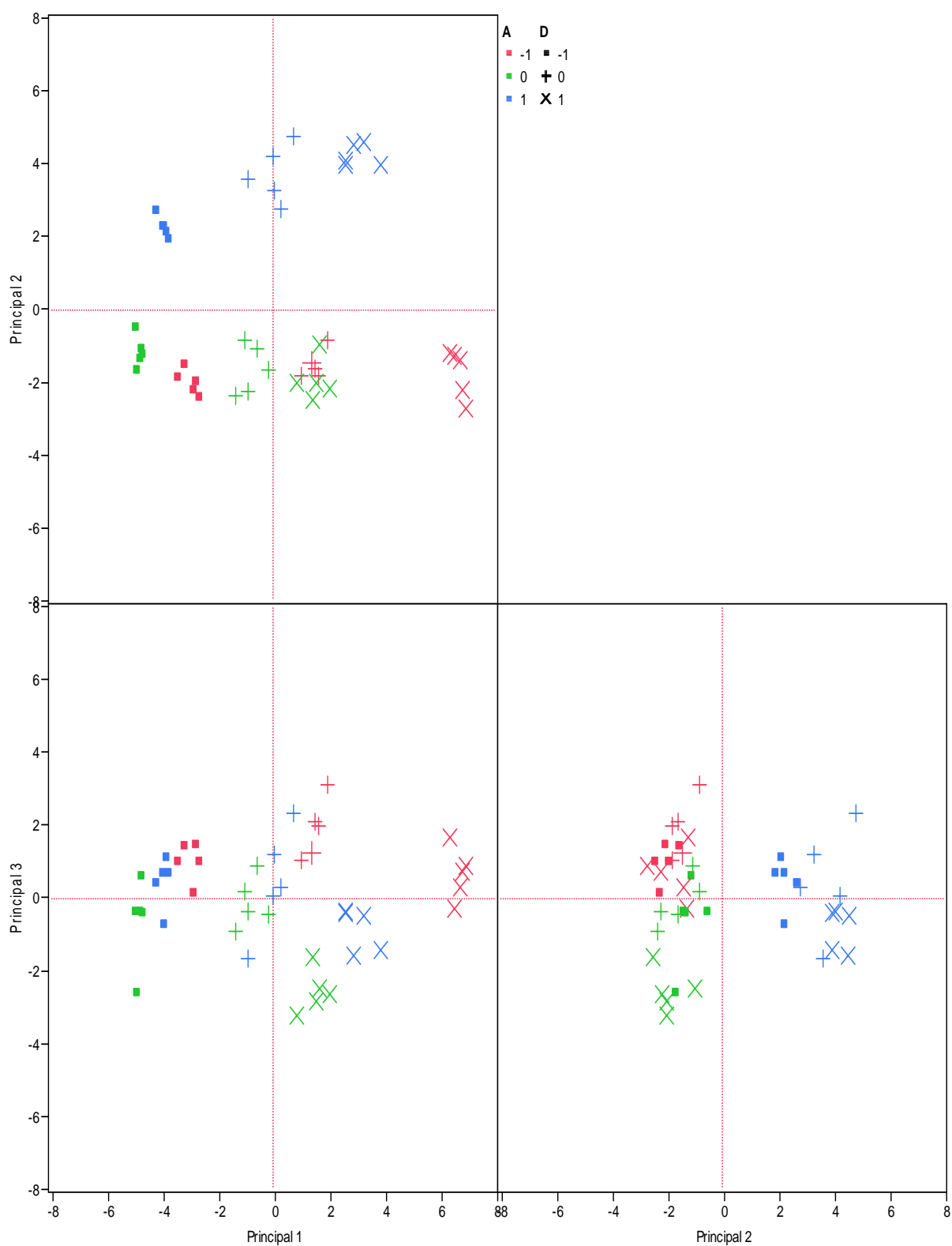


Figure 6. 31 : Cartes des produits

### 3.4.2 Analyse de variance:

L'analyse de variance, abrégée en **ANOVA**, détermine l'influence de chaque facteur sur les variations d'une réponse étudiée [85]. Elle étudie les différences de moyenne en utilisant des mesures de variance des facteurs afin de juger la significativité des différences mesurées [86].

Nous avons effectué cette analyse de variance (à 3 facteurs) à l'aide du logiciel JMP, afin de calculer l'influence de chaque facteur sur les propriétés physiques et mécaniques, et d'estimer les coefficients du modèle statistique qui nous permet d'obtenir les propriétés théoriques des tissus que nous n'avons pas testé.

#### 3.4.2.1 Poids des paramètres

Comme l'expose M. GOUPY dans son ouvrage [61], nous avons calculé l'importance (en %) de chaque facteur à partir des sommes des carrés ( $\sum(y_i - \bar{y})^2$ ) données par les analyses de variances (tableau 3.5).

Les résultats notés dans le tableau précédent correspondent bien à ceux obtenus avec l'analyse en composantes principales. Par exemple, la variation dimensionnelle après relaxation en sens trame, l'allongement maximum en sens chaîne, l'épaisseur et la force de rupture en sens chaîne sont principalement dépendants de l'armure d'après le tableau, ce qui est en corrélation avec la figure 6.31, où ces paramètres sont représentés dans le plan CP2-CP3, là où les tissus sont regroupés selon l'armure.

Nous pouvons voir que le liage est le paramètre qui a le moins d'influence sur les propriétés des tissus. Cependant, il faut être prudent quant à l'interprétation de ces résultats car cela ne signifie pas que le liage n'est pas important mais plutôt qu'on n'observe pas de différence de résultat avec les liages utilisés. Cela peut se justifier par le fait que les liages ne sont pas assez différents peut-être parce que le taux de liage est identique pour tous ou parce que les différences d'indice de dispersion caractérisant l'armure de liage ne sont pas assez importantes.

Tableau 3. 6 : Impact des différents facteurs

		Armure	Liage	Duitage
Variation dimensionnelle après relaxation	Chaîne	28,85	19,44	51,71
	Trame	56,46	1,97	41,57
Embuvement	Couche 1	61,36	30,70	7,95
	Couche 2	47,64	20,26	32,10
	Couche 3	93,88	1,59	4,53
Retrait	Couche 1	6,24	1,53	92,23
	Couche 2	26,09	2,09	71,82
	Couche 3	11,03	5,53	83,44
Rigidité de flexion B	Chaîne	20,34	2,25	77,41
	Trame	7,99	15,16	76,85
Module Young E (flexion)	Chaîne	58,53	2,19	39,28
	Trame	55,21	12,49	32,30
Force de rupture	Chaîne	70,49	29,47	0,04
	Trame	4,17	0,34	95,49
Allongement de rupture	Chaîne	76,57	9,82	13,61
	Trame	41,02	15,39	43,59
Énergie de rupture	Chaîne	60,90	8,17	30,93
	Trame	24,42	5,65	69,93
Module Young E (traction)	Chaîne	69,58	22,41	8,01
	Trame	57,08	5,32	37,6
Module de cisaillement G (KES)	Chaîne	19,40	2,97	77,63
	Trame	17,67	2,25	80,08
Module de cisaillement G (Bias)		9,72	3,63	86,65
Énergie de compression		87,62	0,91	11,47
Résilience		90,09	0,42	9,49
Compressibilité		56,3	2,4	41,3
Masse Surfaique		0,21	0,13	99,66
Épaisseur		89,85	5,28	4,87
Perméabilité		7,30	0,96	91,74

Le moins important		Le plus important
--------------------	--	-------------------

### 3.4.2.2 Modèles Statistiques

Les résultats précédents permettent de savoir à quel paramètre il faut s'intéresser lorsqu'on veut influencer les propriétés du tissu. Cependant cela ne nous permet pas de connaître quel niveau est le meilleur, pour cela il faut regarder les coefficients des modèles statistiques :

$$y = Cste + \text{Armure} \begin{cases} A \\ B \\ C \end{cases} + \text{Liage} \begin{cases} L1 \\ L2 \\ L3 \end{cases} + \text{Duitage} \begin{cases} D1 \\ D2 \\ D3 \end{cases}$$

Le tableau 3.7 permet de calculer les résultats que nous aurions obtenus en testant les autres tissus. Afin de vérifier l'exactitude des modèles proposés nous pouvons dans un premier temps comparer les valeurs mesurées et les valeurs théoriques (tableaux 3.8, 3.9 et 3.10) et dans un second temps prévoir d'après les modèles quel tissu aurait obtenu les meilleurs et les moins bonnes propriétés et vérifier quelques-uns de ces résultats.

On peut voir dans les tableaux 3.8, 3.9 et 3.10 que les valeurs mesurées et les valeurs théoriques sont très proches les unes des autres, cela semble logique car les modèles statistiques ont été déduits de ces mesures. Quant à lui, le tableau 3.11 donne les maximums et minimums théoriques. Pour vérifier l'exactitude des modèles il faudrait faire les mesures sur les tissus concernés afin de comparer les valeurs mais par manque de temps nous l'avons seulement fait pour les valeurs de masse surfacique et de perméabilité.

Tableau 3. 7 : Coefficients des modèles statistiques

	Cste	A	B	C	L1	L2	L3	D16	D20	D24
Masse surfacique	446,88	2,29	-1,05	-1,24	-1,80	1,25	0,55	-43,52	0,07	43,45
Épaisseur	1,305	-0,09	-0,057	0,151	-0,034	0,029	0,005	-0,035	0,014	0,021
Variation dim ap relax Ch.	-14,44	0,71	-0,56	-0,16	-0,59	0,44	0,14	-0,86	-0,02	0,88
Variation dim ap relax Tr	-8,10	0,53	-0,17	-0,37	-0,07	0,10	-0,03	-0,20	0,47	-0,27
Embuvage couche 1	2,2	-0,2	-0,4	0,6	0,2	-0,4	0,2	-0,2	0,2	0,0
Embuvage couche 2	2,0	0,3	-0,3	-0,1	0,1	-0,2	0,1	-0,1	0,3	-0,2
Embuvage couche 3	2,9	-0,4	-1,0	1,4	0,2	-0,2	0,0	-0,2	-0,1	0,3
Retrait couche 1	2,6	0,0	-0,2	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,8	0,1	0,7
Retrait couche 2	2,5	0,2	-0,5	0,3	-0,1	0,0	0,1	-0,8	0,2	0,6
Retrait couche 3	2,3	0,1	-0,3	0,2	0,0	0,2	-0,2	-0,9	0,2	0,7
Perméabilité	636,76	-54,29	50,71	3,58	-6,36	21,44	-15,09	184,24	4,31	-188,5
G Ch. (KES)	0,540	0,056	0,005	-0,062	-0,022	-0,003	0,024	-0,117	-0,003	0,120
G Tr (KES)	0,534	0,080	-0,033	-0,046	-0,025	0,001	0,024	-0,146	-0,003	0,149
G (Bias Extension Test)	0,34	0,05	-0,08	0,02	0,01	-0,05	0,04	-0,18	-0,05	0,22
F Ch	12,49	0,61	-0,02	-0,59	-0,04	0,41	-0,37	-0,01	0,02	0,00
F Tr	12,75	0,54	-0,42	-0,11	-0,10	-0,06	0,16	-2,44	0,23	2,21
All Ch	23,38	-0,18	-0,73	0,91	0,03	-0,31	0,28	-0,41	0,23	0,17
All Tr	26,45	-0,26	-2,14	2,41	0,35	-1,54	1,19	-1,88	-0,76	2,64
Énergie Ch	245,35	8,96	-7,71	-1,25	-3,16	3,00	0,16	-6,78	2,18	4,59
Énergie Tr	299,91	13,08	-58,98	45,89	10,41	-29,38	18,96	-86,70	-7,66	94,36
E Young Ch (traction)	2,91	0,53	-0,23	-0,30	-0,26	0,27	-0,01	0,17	-0,03	-0,14
E Young Tr (traction)	2,97	0,41	-0,38	-0,04	0,03	0,10	-0,13	-0,37	0,23	0,14
B Ch	555,19	137,5	-17,81	-119,68	-33,94	-14,50	48,44	-238,66	-25,97	264,64
B Tr	553,47	60,60	-51,34	-9,25	-52,69	-36,76	89,45	-180,25	10,22	170,02
E Young Ch (flexion)	3,10	1,30	0,07	-1,37	-0,05	-0,23	0,28	-1,00	-0,17	1,17
E Young Tr (flexion)	3,03	0,90	-0,04	-0,86	-0,13	-0,34	0,47	-0,65	-0,03	0,69
WC	0,430	-0,091	-0,007	0,098	-0,009	0,010	-0,001	0,035	-0,001	-0,034
Résilience	39,20	-2,87	7,34	-4,46	0,49	-0,12	-0,36	2,35	-0,75	-1,60
Compressibilité	21,75	-1,97	-1,18	3,15	-0,41	0,65	-0,24	2,03	0,57	-2,59

Tableau 3. 8 : Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs théoriques –Partie 1

		A1 16				A2 20				A3 24			
		Mesurées		Théoriques		Mesurées		Théoriques		Mesurées		Théoriques	
		Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	TR	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
Embuvage et Retrait en %	C1	2,1	1,9	2,0	1,9	1,8	2,7	1,7	2,7	1,9	3,2	2,2	3,1
	C2	2,2	1,7	2,4	1,8	2,4	2,7	2,4	2,8	2,4	3,6	2,3	3,4
	C3	2,3	1,5	2,4	1,5	2,4	2,7	2,2	2,8	2,7	3,0	2,7	2,9
Variation dim ap relax		-15,1	-8	-15,2	-7,83	-13,5	-7,2	-13,3	-7	-12,6	-7,5	-12,7	-7,9
G rigidité cis (KES)		0,420	0,410	0,458	0,443	0,61	0,60	0,59	0,61	0,84	0,81	0,74	0,8
F rupture		13,18	10,38	13,05	10,75	13,38	13,9	13,52	13,5	12,6	15,5	12,7	15,7
All rupt		22,44	24,2	22,82	24,66	23,3	24,5	23,1	23,9	23,9	30	23,6	30
Énergie Rupt		239,8	210,5	244,4	236,7	262,8	301	259,5	276	261	415	259	426
E Young (traction)		3,36	3,04	3,35	3,04	3,9	3,9	3,7	3,7	3,01	3,20	3,3	3,4
B rigidité flexion		383,6	353	420,1	381,1	635	587,3	652,2	587,5	1048	891	1006	873
E Young (flexion)		3,233	2,975	3,358	3,138	3,7	3,4	4	3,6	6,23	5,3	5,86	5,1
Masse surfacique		404,4		403,8		449		450		497		493	
Épaisseur		1,125		1,141		1,272		1,254		1,3		1,2	
Perméabilité		752,65		760,36		616,05		608,22		391,8		378,8	
WC énergie de compression		0,333		0,365		0,402		0,348		0,33		0,31	
RC résilience		38,39		39,16		37,15		35,45		35,6		34,4	
Compressibilité		21,35		21,39		22,75		20,99		17,4		16,9	
G (bias extension test)		0,202		0,228		0,315		0,304		0,67		0,65	

Tableau 3. 9 : Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs théoriques –Partie 2

		B1 20				B2 24				B3 16			
		Mesurées		Théoriques		Mesurées		Théoriques		Mesurées		Théoriques	
		Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	TR	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
Embuvement et Retrait %	C1	2	2,6	2,3	2,6	1,5	3,1	1,4	3,1	1,9	1,4	1,8	1,5
	C2	2,3	2,3	2,2	2	1,2	2,5	1,4	2,6	1,8	1,2	1,8	1,3
	C3	1,9	2,4	2	2,3	1,9	2,9	2	2,9	1,8	1,7	1,6	0,9
Variation dim ap relax		-15,5	-7,5	-15,6	-7,87	-13,6	-8,6	-13,7	-8,43	-15,9	-8,7	-15,7	-8,5
G rigidité cis (KES)		0,51	0,50	0,52	0,47	0,63	0,61	0,66	0,65	0,38	0,37	0,45	0,38
F rupture		12,22	11,91	12,45	12,46	12,82	13,78	12,88	14,48	12,07	11,91	12,10	10,1
All rupt		23,26	23,42	22,91	23,90	22,08	24,58	22,51	25,41	22,93	23,42	22,52	23,6
Énergie Rupt		238,1	227,1	236,7	243,7	231,6	271,4	245,2	305,9	236,7	197,4	231,0	173
E Young (traction)		2,07	2,69	2,38	2,85	2,78	2,84	2,80	2,83	3,11	2,29	2,83	2,10
B rigidité flexion		539,1	468,9	477,5	459,6	739,9	620,4	787,5	635,4	326,4	416	347,2	411
E Young (flexion)		3,434	2,988	2,948	2,824	3,905	3,274	4,106	3,344	2,12	2,706	2,444	2,81
Masse surfacique		444,95		444,11		490,58		490,53		402,18		402,87	
Épaisseur		1,235		1,228		1,315		1,298		1,227		1,218	
Perméabilité		676,35		685,42		509,45		520,36		894,6		856,62	
WC énergie de compression		0,445		0,412		0,408		0,399		0,51		0,456	
RC résilience		48,33		46,26		44,57		44,81		51,14		48,52	
Compressibilité		19,73		20,73		18,72		18,63		22,93		22,36	
G (bias extension test)		0,246		0,231		0,416		0,442		0,136		0,125	

Tableau 3. 10 : Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs théoriques –Partie 3

		C1 24				C2 16				C3 20			
		Mesurées		Théoriques		Mesurées		Théoriques		Mesurées		Théoriques	
		Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	TR	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
Embuvement et Retrait %	C1	2	2,6	2,3	2,6	1,5	3,1	1,4	3,1	1,9	1,4	1,8	1,5
	C2	2,3	2,3	2,2	2	1,2	2,5	1,4	2,6	1,8	1,2	1,8	1,3
	C3	1,9	2,4	2	2,3	1,9	2,9	2	2,9	1,8	1,7	1,6	0,9
Variation dim ap relax		-14,5	-9	-14,3	-8,80	-14,9	-8,2	-15	-8,57	-14,4	-8,2	-14,5	-8
G rigidité cis (KES)		0,59	0,62	0,57	0,61	0,38	0,38	0,36	0,34	0,47	0,46	0,50	0,51
F rupture		11,84	15,26	11,85	14,75	12,2	10,03	12,29	10,13	11,7	12,54	11,55	13
All rupt		24,47	31,6	24,49	31,86	23,81	25,52	23,57	25,43	24,33	28,93	24,81	29,3
Énergie Rupt		249,7	463,5	245,5	450,6	240,2	222,89	240,3	229,7	239,3	332,5	246,4	357
E Young (traction)		2,47	3,26	2,21	3,10	2,78	2,47	3,05	2,67	2,63	3,08	2,57	3,03
B rigidité flexion		648,6	670,9	666,2	661,5	236,5	351,2	182,3	327,2	417,1	617,9	458	643,9
E Young (flexion)		2,553	2,641	2,856	2,725	0,956	1,42	0,498	1,180	1,673	2,48	1,840	2,6
Masse surfacique		489,24		487,28		404,45		403,37		450,19		446,27	
Épaisseur		1,45		1,443		1,437		1,450		1,441		1,475	
Perméabilité		464,5		445,42		852,6		846,02		612,15		629,56	
WC énergie de compression		0,482		0,486		0,534		0,573		0,478		0,526	
RC résilience		33,74		33,62		38,18		36,96		35,32		33,62	
Compressibilité		21,29		21,9		26,89		27,57		24,69		25,23	
G (bias extension test)		0,610		0,599		0,161		0,146		0,332		0,358	

Tableau 3. 11 : Valeurs maximales et minimales théoriques

		MAXIMUM		MINIMUM	
		Tissu	Valeur	Tissu	Valeur
Masse surfacique, (g/m <sup>2</sup> )		A2 24	493,87	C1 16	400,32
Épaisseur, (mm)		C2 24	1,506	A1 16	1,141
Perméabilité, (l/m <sup>2</sup> /s)		B2 16	893,16	A3 24	378,82
WC énergie de compression, (gf.cm/cm <sup>2</sup> )		C2 16	0,573	A1 24	0,297
RC résilience, (%)		B1 16	49,37	C3 24	32,77
Compressibilité, (%)		C2 16	27,57	A1 24	16,77
G cisaillement (Bias), ( cN/cm.deg)		A3 24	0,653	B2 16	0,044
Embuvaage, (%)	Couche 1	C1 20	3,2	B2 16	1,2
	Couche 2	A3 20	2,8	B2 24	1,4
	Couche 3	C1 24	4,8	B2 16	1,5
Retrait, (%)	Couche 1	C1 24	3,5	B3 16	1,5
	Couche 2	C3 24	3,4	B1 16	1,1
	Couche 3	C2 24	3,5	B3 16	0,9
Variation dimensionnelles après relaxation, (%)	Chaîne	B1 16	-16,44	A2 24	-12,41
	Trame	C1 24	-8,80	A2 20	-7,00
G cisaillement (KES), (gf/cm.deg)	Chaîne	A3 24	0,740	C1 16	0,340
	Trame	A3 24	0,787	C1 16	0,317
Force de rupture, (kN)	Chaîne	A2 20	13,52	C3 16	11,52
	Trame	A3 24	15,66	B1 16	9,79
Allongement rupture, (%)	Chaîne	C3 20	24,81	B2 16	21,93
	Trame	C3 24	32,70	B2 16	20,88
Énergie Rupture, ( J)	Chaîne	A2 24	261,90	B1 16	227,71
	Trame	C3 24	459,13	B2 16	124,86
E Young (traction), (MPa)	Chaîne	A2 16	3,87	C1 24	2,21
	Trame	A2 20	3,72	B3 16	2,1
B rigidité flexion, (μN.m)	Chaîne	A3 24	1005,7	C1 16	162,91
	Trame	A3 24	873,54	B1 16	269,19
E Young (flexion), (Mpa)	Chaîne	A3 24	5,856	C2 16	0,498
	Trame	A3 24	5,082	C2 16	1,180

Nous avons effectué les mesures de masse surfacique minimum sur un tissu hors de plan d'expériences (le tissu **B1.16**) qui d'après le modèle statistique devrait obtenir la deuxième plus faible valeur. Les mesures ont été effectuées sur 5 éprouvettes (tableau 3.12) pour seulement avoir un résultat approximatif pour pouvoir comparer aux valeurs théoriques.

Tableau 3. 12 : Comparaison des valeurs de la masse surfacique et de la perméabilité

		MAXIMUM			MINIMUM		
		Nom tissu	Théorique	Mesurée	Nom tissu	Théorique	Mesurée
<b>Masse Surf.</b>	<b>g/m<sup>2</sup></b>	A2 24	493,87	497,73	B1 16	400,52	403,93
<b>Perméabilité</b>	<b>l/m<sup>2</sup>/s</b>	B2 16	893,16	878,60	A3 24	378,82	391,75

Les valeurs sont assez proches les unes des autres ce qui signifie que les modèles statistiques de ces deux réponses sont fiables et nous considérons que les autres le sont aussi.

Ils peuvent donc être utilisés pour prévoir les propriétés physiques et mécaniques des 27 tissus qu'ils régissent afin de savoir lequel sera le plus approprié à telle ou telle application sans avoir à tous les tester.

Les trois types d'analyse statistique ont leurs avantages et leurs inconvénients. L'ACP est la méthode la plus visuelle mais elle ne nous permet pas d'obtenir des données chiffrées. L'analyse de variance nous renseigne sur le poids de chaque paramètre du tissu sur les propriétés et c'est le modèle statistique qui nous permet d'anticiper les valeurs des réponses.

### **4. Conclusion**

L'objectif de ce chapitre était d'effectuer des tests sur 9 différents tissus triple couches afin de déterminer l'effet de plusieurs paramètres (duitage, liage, armure) sur les propriétés mécaniques et physiques du tissu et de mettre en relation ces données et par la suite prévoir le comportement du tissu selon l'armure, le liage et le duitage au moyen d'un modèle mathématique théorique.

L'analyse statistique des résultats a montré que l'influence de duitage et l'armure sur les propriétés du tissu est presque identique et sont les paramètres les plus influents tandis que la distribution des points de liage est le paramètre qui a le moins d'influence sur les propriétés des tissus.

Le modèle statistique obtenu par l'analyse de variance peut être considéré comme un modèle valide pour prévoir les propriétés mécaniques et physiques d'un tissu triple couches après avoir le vérifié sur le tissu B1.16 pour deux réponses (masse surfacique et perméabilité).





# **CHAPITRE 5**

## **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**



## 1. Conclusions

L'objectif de ce travail est d'étudier les structures textiles tissées multicouches liées. Pour ce faire, il a été nécessaire de formaliser la description des liages entre les couches, de développer des modules mathématiques décrivant ces tissus et de programmer ces modules sous forme de module de conception de textile assisté par ordinateur.

Pour ce qui concerne le CAO, nous avons développé plusieurs modules mathématiques programmables qui abordent la conception des armures assistée par ordinateur pour deux types de tissus multicouches double et triple couches.

Le premier module développé nous présente une méthode de génération mathématique de tissus double couches liées par des chaînes supplémentaires. Ce module a été vérifié mathématiquement et un logiciel écrit par Visual Basic fondé sur ce module a été développé.

Le deuxième module mathématique a été développé en se fondant sur les travaux de Chen, pour générer mathématiquement un tissu triple couche liées par les chaînes de la couche intermédiaire. Un logiciel fondé sur ce module a été proposé.

Le troisième module mathématique développé classe les points de liage générés automatiquement par le logiciel dans le tissu triple couche lié par les chaînes de la couche intermédiaire. Ce classement se fait en fonction du taux de liage disponible et le logiciel développé regroupe les points selon une armure appelé l'armure de liage.

Une nouvelle approche a été abordée pour classer les armures de liage. Les différentes armures de liage générées par le logiciel sont regroupées selon la répartition des points de liage. Pour ce faire, nous avons appliqué deux méthodes :

- La première est la méthode du moment d'inertie, dans laquelle on calcule le moment des points autour du centre de l'armure de liage fondée sur le principe suivant: plus le moment est faible plus les points sont concentrés. Mais on a constaté que cette méthode comporte un défaut et elle n'est pas bien adaptée pour classer les armures de liage.

- La deuxième méthode est la méthode de plus proche voisin. On a calculé l'indice de voisinage pour chaque armure de liage, cet indice donne une idée sur la dispersion des points de liage dans l'armure de liage, plus l'indice est grand plus les points sont dispersés. On a constaté que bien que cette méthode tienne compte du motif de l'armure de liage et de ses voisins, il y a des motifs ayant un indice de voisinage différent pour les mêmes répartitions des points de liage.

Par contre, la comparaison entre les deux méthodes (la méthode du moment d'inertie et la méthode de plus proche voisin) montre que d'un côté le taux de différence est plus petit dans la méthode du plus proche voisin et de l'autre côté elle est la plus simple et la plus visuelle. Nous avons donc choisi de garder avec précaution l'indice de dispersion comme valeur permettant de caractériser la dispersion des points de liage et pour classer les armures de liage suivant la dispersion des points de liage dans l'armure.

Pour ce qui concerne les propriétés mécaniques du tissu triple couche, notre but était de déterminer l'effet de plusieurs paramètres (armure, liage, duitage) sur les propriétés mécaniques et physiques du tissu, d'identifier ceux qui ont le plus d'influence et de définir le modèle mathématique qui détermine la relation entre ces propriétés et ces paramètres pour prévoir les propriétés du tissu avant le tissage.

Pour ce faire, nous avons choisi d'attribuer à chaque paramètre 3 valeurs, donc nous avons obtenu 27 tissus différents. Nous avons adopté l'armure toile au tissu d'endroit et tissu d'envers tandis que le tissu intermédiaire est de la toile, du sergé et du cannelé, puis ces tissus sont générés automatiquement par le logiciel développé. Trois duitages 16, 20 et 24 et trois armures de liage ayant l'indice de dispersion 1, 1.21 et 1.32 ont été choisis. Ces tissus ont été tissés sur un métier à tisser Muller NCE.

À l'aide de plans d'expériences, le nombre de tissus tissés et testés a été ramené à 9 tissus. Les tests sont effectués dans notre laboratoire pour déterminer les propriétés mécaniques et physiques des tissus. Ces propriétés sont:

- L'embuage, le retrait, la masse surfacique et la perméabilité.

- La compression: l'énergie de compression, la résilience, la compressibilité, l'épaisseur
- La flexion : la rigidité de flexion, le module d'Young
- Le cisaillement: la rigidité de cisaillement,
- La traction: la force de rupture, l'allongement maximal, l'énergie de rupture, le module d'Young

A l'aide de logiciel JMP, l'analyse des résultats a été réalisée et la relation entre les paramètres (armure, liage, duitage) et les paramètres des tissus (Propriétés mécaniques et physiques) ont été définies pour trouver le modèle statistique suivant:

$$y = \text{Cste} + \text{Armure} \begin{cases} A \\ B \\ C \end{cases} + \text{Liage} \begin{cases} L1 \\ L2 \\ L3 \end{cases} + \text{Duitage} \begin{cases} D1 \\ D2 \\ D3 \end{cases}$$

Ce modèle théorique a été confirmé expérimentalement sur un tissu hors de plan d'expérience.

Ce modèle permet de prédire la qualité du produit textile final et d'éviter des problèmes dans les processus de fabrication des tissus triples.

Les différentes analyses effectuées (analyse de variance et analyse de composants principaux) ont montré que le duitage et l'armure sont les paramètres les plus influents tandis que la distribution des points de liage est le paramètre qui a le moins d'influence sur les propriétés des tissus.

## 2. Perspectives

Concernant le module mathématique pour la génération des points de liage pour un tissu triple couches liées par les chaînes de la couche intermédiaire (double liage), on désire le généraliser pour être applicable sur tous types de tissus double et triple couches.

En fait, nous avons vérifié ce module (des vérifications mathématiques préliminaires) sur des tissus triple couches auto-liées, on a constaté qu'en effectuant quelques modifications mathématiques supplémentaires il sera compatible avec les tissus suivants :

- Tissu triple couches à double liage par les couches extérieures  $\mathbf{V\Lambda}$ .
- Tissu triple couches liées par descension  $\mathbf{V}$ .
- Tissu triple couches liées par ascension  $\mathbf{\Lambda}$ .
- Tissu double couches liées par descension  $\mathbf{V}$
- Tissu double couches liées par ascension  $\mathbf{\Lambda}$
- Tissu double couches à double liage  $\mathbf{V\Lambda}$

Donc, en complétant ces modifications, un logiciel de génération des points de liage pour les tissus double et triple couches sera développé.

Quant au classement des armures de liage selon la dispersion des points de liage, bien que la méthode du plus proche voisin utilisée dans ce travail ne soit pas la plus précise, on propose de l'utiliser dans un premier temps, puis de développer, si besoin est, une autre méthode plus précise.

Concernant le modèle théorique obtenu pour prédire les propriétés mécaniques d'un tissu triples couches, on propose de définir le tissu par un paramètre (facteur de tissu ) décrivant les armures des trois couches et utiliser l'indice de dispersion des points de liage afin de modifier les modèles statistiques en y incluant des valeurs quantitatives plutôt que les données qualitatives (A, B, C) comme nous l'avons fait. Ensuite, il serait approprié de vérifier les nouveaux modèles avec d'autres tissus ou bien de tester d'autres tissus en changeant les armures des couches du haut et du bas afin de déterminer des modèles plus précis et complets.

# **REFERENCES**

# **BIBLIOGRAPHIQUES**





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Adanur, S., *Handbook of Weaving*. 2000, CRC Press, New York, USA.
- [2]. Duquesne, H., *Le tissage et ses armures*. 1976, Institut Textile de France, Parris, France.
- [3]. Brossard, I., *Technologie des textiles*. 1997, Dunod, Paris, France.
- [4]. Kipp, Hans Walter, Schutz, R. A. and Muller, J., *Technique du tissage de rubans*. 1989, Verlag Sauerlander, Aarau, Francfort-sur-le-Main, Salzbourg, Allemagne.
- [5]. Goerner, D., *Woven Structure and Design Part 1 Single Cloth Construction*. 1986, Wira Technology Group, Leeds, England.
- [6]. Gokarneshan, N., *Fabric Structure and Design*. 2005, New Age International (P) Ltd, New Delhi, India.
- [7]. Oelsner, G. H., *A Handbook of Weaves*. 1952, The Macmillan Company, New York, USA.
- [8]. CARAMARO, L., *Textile à usage technique*. 1997, Université Claude-Bernard, Lyon, France.
- [9]. Horrocks, A. R. and Anand, S. C., *Handbook of Technical Textiles*. 2000, CRC Press, New York, USA.
- [10]. Goerner, D., *Woven Structure and Design Part 2 Compound Structures*. 1989, British Textile Technology Group, Leeds, England.
- [11]. Lambrette, A., *Tout Le Tissage : Tome IV*. 1949, Les Éditions Textile et Technique, Paris, France.
- [12]. Nemoz, G., *Textures textiles tridimensionnelles*. 2003, Institut Français du Textile-Habillement, Techniques de l'ingénieur, France.
- [13]. Labriffe, S., Labriffe, C. and Bon, A., *Manuel de tissage : Tissus complexes*. 1948, Éditions J.b Baillière, Paris, France.
- [14]. Ping, G. and Lixin, D., *Algorithms for Computer-aided Construction of Double Weaves: Application of the Kronecker Product*. *Journal of the Textile Institute*, 1999, 90, p. 158 - 176.

- [15]. Chen, X. & Wang, H. *Modelling and computer-aided design of 3D hollow woven reinforcement for composites*. Journal of the Textile Institute, 2006, 97, p. 79–87.
- [16]. Fang, G. and Liang, J., *A review of numerical modeling of three-dimensional braided textile composites*. Journal of Composite Materials, Nov. 2011, vol. 45, n° 23, p. 2415-2436.
- [17]. Lin, H., Zeng, X., Sherburn, M., Long, A.C., and Clifford, M. J., *Automated geometric modeling of textile structures*, Textile Research Journal, Oct. 2012, vol. 82, n° 16, p. 1689-1702.
- [18]. Liao, T. and Adanur, S., *A Novel Approach to Three-Dimensional Modeling of Interlaced Fabric Structures*, Textile Research Journal, Nov. 1998, vol. 68, n° 11, p. 841 -847.
- [19]. Martin, S.A. and Chen, X., *CAD and constraint-based geometric modeling algorithms for 2d and 3d woven textile structures*, Journal of Information and Computing Science, 2008, vol. 3, n° 3, p. 199-214.
- [20]. Renkens, W. and Kyosev, Y., *Geometry modelling of warp knitted fabrics with 3D form*, Textile Research Journal, Janv. 2011, vol. 81, n° 4, p. 437-443.
- [21]. Robitaille, F., Clayton, B.R., Long, A.C., Souter, B.J. and Rudd, C.D., *Geometric modelling of industrial performs: Warp-knitted textiles*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Materials Design and Applications, Avr. 2000, vol. 214, n° 2, p. 71-90.
- [22]. Robitaille, F., Clayton, B.R., Long, A.C., Souter, B.J. and Rudd, C.D., *Geometric modelling of industrial performs: Woven and braided textiles*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Materials Design and Applications, Avr. 1999, vol. 213, n° 2, p. 69-83.
- [23]. Sheng, S.Z. and Hoa, S.V., *Three Dimensional Micro-Mechanical Modeling of Woven Fabric Composite*, Journal of Composite Materials, Janv. 2001, vol. 35, n° 19, p. 1701-1729.

- [24]. Winkler, F., *Computers in the World of Textiles*. 1984, Hyperion Books, New York, USA.
- [25]. <http://fr.pointcarre.com/>, consulté le 15/10/2012.
- [26]. <http://ng.nedsense.com/>, consulté le 10/10/2012.
- [27]. <http://www.arahne.si/>, consulté le 12/10/2012.
- [28]. <http://www.scotweave.com/>, consulté le 15/10/2012.
- [29]. Chen, X. and Potiyaraj, P., *CAD/CAM of Orthogonal and Angle-Interlock Woven Structures for Industrial Applications*, Textile Research Journal, 1999, vol. 69, n° 9, p. 648 -655
- [30]. Pourdeyhimi, B., *Programming Techniques in Computer-aided Design of Woven Fabrics* , Journal of the Textile Institute,1989, vol. 80, n° 3, p. 391 - 401.
- [31]. Lourie, J. R., *Textile Graphics/Computer Aided*. 1973, Fairchild Books, USA.
- [32]. Newton, A. and Sarkar, B. P., *An Analysis Of Compound Weaves* , Journal of the Textile Institute, 1979, vol. 70, n° 10, p. 427 - 438.
- [33]. Milasius, V. and Reklaitis, V., *The Principles of Weave-coding*, Journal of the Textile Institute, 1988, vol. 79, n° 4, p. 598-605.
- [34]. Chen, X., Knox, R.T., McKenna, D. F. and Mather, R.R., *Automatic Generation of Weaves for the CAM of 2D and 3D Woven Textile Structures* , Journal of the Textile Institute, 1996, vol. 87, n° 2, p. 356 - 370.
- [35]. Chen, X. and Potiyaraj, P., *CAD/CAM for Complex Woven Fabrics. Part I: Backed Cloths*, Journal of the Textile Institute, 1998, vol. 89, n° 3, p. 532 - 545.
- [36]. Chen X. and P. Potiyaraj, *CAD/CAM for Complex Woven Fabrics. Part II: Multi-layer Fabrics*, Journal of the Textile Institute, 1999, vol. 90, n° 1, p. 73 - 90.
- [37]. Ping, G. and Lixin, D., *The Algorithm for Computer Construction Backed Weaves*, Textile Research Journal, 1995, n° 6, p. 49-52.
- [38]. Ping, G. and Lixin, D., *Study of the Mathematical Model for Fabric Weave Design and its Applications* , Journal of the Textile Institute, 1997, vol. 88, n° 3, p. 265-281.

- [39]. Chen, X., *Mathematical modelling of 3D woven fabrics for CAD/CAM software*, Textile Research Journal, Janv. 2011, vol. 81, n° 1, p. 42 -50.
- [40]. Lomov, S., Perie, G., Ivanov, D., Verpoest, I. and Marsal, D., *Modeling three-dimensional fabrics and three-dimensional reinforced composites: challenges and solutions*, Textile Research Journal, janv. 2011, vol. 81, n° 1, p. 28 -41.
- [41]. Jiang, Y. and Chen, X., *Geometric and algebraic algorithms for modelling yarn in woven fabrics*, Journal of the Textile Institute, 2005, vol. 96, n° 4, p. 237-245.
- [42]. Osselin, J.-F., *Génération automatique d'armures de grand rapport : Algorithme génétique*, Thèse de doctorat, 2001, UHA, Mulhouse, France.
- [43]. Chen, X., KNOX, R. T., MCKENNA, D. F. and Mather, R. R., *Relationships between layer linkage and mechanical properties of 3D woven textile structures*, Textiles and Composites, 1992, p. 166-172.
- [44]. Elsayed A. E. and Poona D., *The Influence Of The Weave And The Method Of Stitching On Selected Mechanical Properties Of Woven Double Fabrics*, AUTEX Research Journal, juin 2008, vol. 8, n° 2, p. 41-43.
- [45]. Chen, X., Spola, M., Paya, J. G. and Sellabona P. M., *Experimental Studies on the Structure and Mechanical Properties of Multi-layer and Angle-interlock Woven Structures*, Journal of the Textile Institute, 1999, vol. 90, n° 1, p. 91-99.
- [46]. Tong, L., Mouritz, A. P. and Bannister, M., *3D Fiber Reinforced Polymer Composites*. 2002, Elsevier Science, Oxford, kidlington, uk.
- [47]. Mitchell, A., *The Esri Guide to Gis Analysis: Geographic Patterns and Relationships*. 1999, Environmental Systems Research Institute Inc, U.S.A.
- [48]. Ebdon, D., *Statistics in Geography: A Practical Approach*, 1977, B. Blackwell, England.
- [49]. GRASLAND, C., *Analyse spatiale : formes et processus, Distribution statistique et distribution spatiale*.1992, Université de Paris 7, Paris, France.
- [50]. TULEMAT, M.A., *Étude de poches tissées complexes gonflables : application automobile*, Thèse de doctorat, 2007, UHA, Mulhouse-FRANCE.
- [51]. Galuszynski, S., *Fabric Tightness: A Coefficient to Indicate Fabric Structure*, Journal of the Textile Institute, 1981, vol. 72, n° 1, p. 44-49.

- [52]. Seyam, A. M., *Structural Design of Woven Fabrics: Theory and Practice*, Textile Progress, 2001, vol. 31.
- [53]. Brierly, S., *Theory and practice of cloth setting*, Textile manufacture, 1931.
- [54]. Love, L., *Graphical Relationships in Cloth Geometry for Plain, Twill, and Sateen Weaves*, Textile Research Journal, janv. 1954, vol. 24, n° 12, p. 1073-1083.
- [55]. Peirce, F.T., *The Geometry of Cloth Structure*, Journal of the Textile Institute Transactions, 1937, vol. 28, n° 3, p. T45-T96.
- [56]. Seyam, A. and El-Shiekh, A., *Mechanics of woven fabrics. Part I. Theoretical investigation of weavability limit of yarns with thickness variation*, Textile Research Journal, 1990, vol. 60, n° 7, p. 389-404.
- [57]. Seyam, A. and El-Shiekh, A., *Mechanics of woven fabrics. Part II. Experimental study of weavability limit of yarns with thickness variation*, Textile Research Journal, 1990, vol. 60, n° 8, p. 457-463.
- [58]. Seyam, A. and El-Shiekh, A., *Mechanics of woven fabrics. Part III: Critical review of weavability limit studies*, Textile Research Journal, 1993, vol. 63, n° 7, p. 371-378.
- [59]. Seyam, A. and El-Shiekh, A., *Mechanics of Woven Fabrics: Part IV: Critical Review of Fabric Degree of Tightness and Its Applications*, Textile Research Journal, nov. 1994, vol. 64, n° 11, p. 653-662.
- [60]. DALAL, M., Contribution à l'étude de la saturation des tissus simples et multicouches: tissus 2D et 3D, Thèse de doctorat, 2012, Université de Haute-Alsace, Mulhouse, France.
- [61]. Goupy, J. and Creighton, L., *Introduction aux plans d'expériences*, 4<sup>e</sup> éd, 2009, Dunod, Paris, France.
- [62]. GOUPY, J., *Plans d'expériences : Traité Analyse Chimique et Caractérisation*, 1992, Techniques de l'ingénieur, France.
- [63]. Box, G.E., Hunter, W.G. and Hunter, J. S., *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*, 1st ed, 1978, John Wiley and Sons Inc, USA.

- [64]. GILLON, F., *Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à commutations électriques*, Thèse de doctorat, 1997, Université de Lille, Lille, France.
- [65]. Maurice, P., *Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi*, 1992, Les Éditions d'Organisation, Paris, France.
- [66]. SINGERY, V., *Étude des propriétés mécaniques des tissus multicouches*, Master Recherche, 2012, UHA, Mulhouse, France.
- [67]. Yueming, W.U., *Évaluation des caractéristiques physiques des étoffes par méthodes classiques et KES : Études des corrélations*, Thèse de doctorat, 1992, UHA, Mulhouse-France.
- [68]. Boisse, P., *Composite Reinforcements for Optimum Performance*. 2011, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, UK.
- [69]. Bilisik, K., *Bending behavior of multilayered and multidirectional stitched aramid woven fabric structures*, Textile Research Journal, janv. 2011, vol. 81, n° 17, p. 1748-1761.
- [70]. Peirce, F. T., *The Handle Of Cloth As A Measurable Quantity*, Journal of the Textile Institute Transactions, 1930, vol. 21, n° 9, p. T377-T416.
- [71]. Saville, B. P., *Physical Testing Of Textiles*, 1999, Woodhead Publishing Limited. Cambridge, UK
- [72]. Skinkle, J. H., *Textile testing: physical, chemical and microscopical*, 1949, Chemical Publishing Company, Revere, USA.
- [73]. Bona, M., *Modern Control Techniques in the Textile Finishing and Make-up*, 1990, Eurotex, Guimaraes Portugal.
- [74]. Dridi, S., *Essais de Caractérisation des Structures Tissées*. Thèse de doctorat, 2010, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France.
- [75]. Launay, J., Hivet, G., Duong, A.V. and Boisse, P., *Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements*, Composites Science and Technology, févr. 2008, vol. 68, n° 2, p. 506-515.

- [76]. Dridi, S., Dogui, A. and et Boisse, P., *Finite element analysis of bias extension test using an orthotropic hyperelastic continuum model for woven fabric*, Journal of the Textile Institute, 2011, vol. 102, n° 9, p. 781-789.
- [77]. Wang, J., Page, J. R. and Paton, R., *Experimental investigation of the draping properties of reinforcement fabrics*, Composites Science and Technology, 1998, vol. 58, n° 2, p. 229-237.
- [78]. El Abed, B., Msahli, S., Bel Hadj Salah, H., and F. Sakli, *Study of woven fabric shear behaviour*, Journal of the Textile Institute, 2011, vol. 102, n° 4, p. 322-331.
- [79]. *JMP Introductory Guide*. 2007, SAS Institute Inc, Cary, NC, USA.
- [80]. *JMP Statistics and Graphics Guide*. 2007, SAS Institute Inc, Cary, NC, USA.
- [81]. *JMP Scripting Guide*. 2007, SAS Institute Inc, Cary, NC, USA.
- [82]. *JMP User Guide*. 2007, SAS Institute Inc, Cary, NC, USA.
- [83]. *JMP Design of Experiments Guide*. 2007, SAS Institute Inc, Cary, NC, USA.
- [84]. Thongsoume, F., *Contribution à l'évaluation tactile des produits textiles par analyse sensorielle*, Thèse de doctorat, 2002, UHA, Mulhouse, France,.
- [85]. Vivier, S., *Stratégies d'optimisation par la méthode des Plans d'Expériences, et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par Éléments Finis*. Thèse de doctorat, 2002, Université des Sciences et Technologie de Lille, Lille, France.
- [86]. Rabier, F., *Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire*, Thèse de doctorat, 2007, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.





# **ANNEXES**

# **ANNEXE 1**

### **A1.1. L'armure toile :**

L'armure toile est la plus simple et la plus utilisée, chaque fil de trame passe successivement au-dessus et en-dessous de chaque fil de chaîne, mais c'est aussi la moins déformable, du fait d'un nombre important d'entrecroisements. Le reps, le cannelé, le natté sont des armures dérivées de la toile.

### **A1.2. L'armure sergée :**

L'armure sergée est formée de flottés chaîne ou trame liés par un point suivant un décochement de un. Le flotté caractérise une bride flottante comprise entre deux pris du tissu. Le sergé est désigné par son rapport d'armure, son effet produit sur la face d'endroit (effet chaîne ou effet trame) et le sens de la croisure ou son effet oblique (cordon à droite si le sens vers le haut ou cordon à gauche si le sens vers le bas). Les sergés les plus utilisés sont ceux de 3, 4, 5.

L'endroit et l'envers du tissu sont différents. Il existe donc des sergés à effet chaîne et des sergés à effet trame. Si l'endroit du sergé est à effet chaîne, cela signifie que les fils de chaîne sont plus visibles que les duites. Par contre, à l'envers du tissu, les duites sont plus visibles que les fils de chaîne. Lorsqu'un sergé à effet chaîne donne à l'endroit du tissu une diagonale allant de gauche à droite, l'envers est un sergé à effet trame avec une diagonale allant en sens inverse. Le sergé croisé, sergé composé et le sergé façonné sont des armures dérivées du sergé.

### **A1.3. L'armure satin :**

Le satin est désigné par son rapport d'armure, son effet produit sur la face endroit (effet chaîne ou trame) et son décochement. La valeur de décochement d'une armure satin régulier de rapport d'armure R peut être un nombre premier (ne possédant de multiplicateur commun) avec le rapport R excepté l'unité et R-1, et elle est inférieure à la moitié du R (tableau A1.1).

L'armure satin donne un tissu brillant à l'endroit et mat à l'envers. Les satins se diffèrent des sergés par un décochement différent de 1. Le décochement peut être un nombre quelconque sans toutefois devenir un diviseur du nombre de fils de l'armure.

Pour l'effet chaîne, le décochement est dans le sens chaîne. Pour l'effet trame, le décochement est dans le sens trame. Le tableau suivant donne la liste des principaux satins.

Le satin à répétition, satin alternatif et satiné sont des armures dérivées de l'armure fondamentale satin.

Tableau A1.1 : L'armure satin en fonction de décochement et du rapport

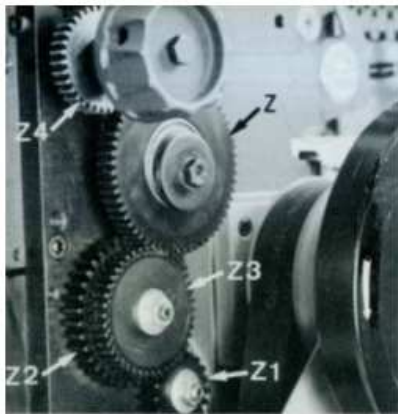
Rapport d'armure Satin	Valeurs de décochements												
4	Satin turc, Irrégulier												
5	1	2	3	4	5								
6	irrégulier												
7	1	2	3	4	5	6	7						
8	1	2	3	4	5	6	7	8					
9	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

# **ANNEXE 2**

### A2.1. Appel de tissu (densité de duites)

La vitesse d'appel de tissu dépend du nombre de duites par cm de l'article à tisser. Le réglage de la vitesse de l'appel de tissu ou le réglage de duitage désiré peut être effectué en desserrant le support z de pignon intermédiaire et en mettant les pignons intermédiaires correspondants. Le jeu des dents engrenées est à régler à environ 0,1 à 0,3 mm. Les combinaisons de pignons sont indiquées sur le tableau à l'intérieur du capot (Figure A2.1).

La gamme standard des densités de duites est de 3 à 45 duites par cm. À l'aide de pignons intermédiaires complémentaires la gamme peut être agrandie à 2 à 45 duites par cm. Les densités de duites peuvent aussi être agrandies entre environ 0,5 à 8,5 duites par cm par un engrenage d'appel spécial.



Z1=40 , Z2=20											
Duites/cm	Z3	Z4	Duites/cm	Z3	Z4	Duites/cm	Z3	Z4	Duites/cm	Z3	Z4
3	37	19	9.5	21	34	20	34	29	33	28	36
3.5	35	21	10	20	34	21	29	26	34	20	29
4	29	20	10.5	19	34	22	36	34	35	20	30
4.5	34	26	11	19	36	23	37	36	36	19	29
5	34	29	11.5	19	37	24	36	37	37	19	30
5.5	36	34	12	37	19	25	34	36	38	21	34
6	36	37	13	36	20	26	19	21	39	21	35
6.5	19	21	14	35	21	27	26	30	40	20	34
7	30	36	15	30	19	28	30	36	41	20	35
7.5	29	37	16	29	20	29	30	37	42	19	34
8	26	35	17	36	26	30	29	37	43	19	35
8.5	20	29	18	34	26	31	26	34	44	19	36
9	19	29	19	37	30	32	26	35	45	19	37

Tableau de combinaisons de pignons

Figure A2. 1 : Les pignons et le tableau de combinaisons

### A2.2. Dispositif de la formation de la foule

Le dispositif de la formation de la foule est composé principalement des organes d'entraînement et de la commande pour le mouvement des lames de tissage. Suivant le programme de commande du dispositif, les fils de chaîne forment la foule de tissage, par laquelle la trame est insérée.

Les éléments de commande de la mécanique de la formation de la foule sont des chaînes de chaîne-dessin (figure A2.2). La longueur de rapport de chaîne-dessin peut être jusqu'à 300 coups (duites) :

De 16 à 36 avec chaîne-dessin, châssis bas

De 16 à 44 : avec chaîne-dessin, châssis haut

De 60 à 300 : avec chaîne-dessin, châssis haut

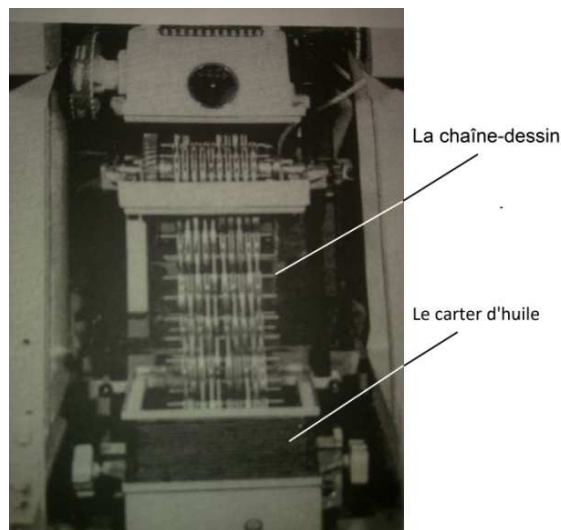


Figure A2. 2 : La chaîne-dessin

### **A2.3. Mécanique de la formation de la foule avec chaîne-dessin:**

#### **A2.3.1. Démontage de la chaîne-dessin**

Pour ouvrir le carter à chaîne-dessin (figure A2.3), on suit les procédures suivantes:

1. Desserrer des deux côtés les vis **A** ainsi que les écrous moletés **B** et **C**.
2. Desserrer des deux côtés les écrous à poignée **D** et donner un petit coup avec la paume de la main sur ces écrous **D**, en sens axial.
3. Pousser le carter d'huile et le soufflet vers le bas.
4. Desserrer les vis **E** des deux côtés ainsi que l'écrou moleté **F**
5. Descendre le tambour à chaîne-dessin d'environ 20 cm et fixer légèrement avec l'écrou moleté **F**.



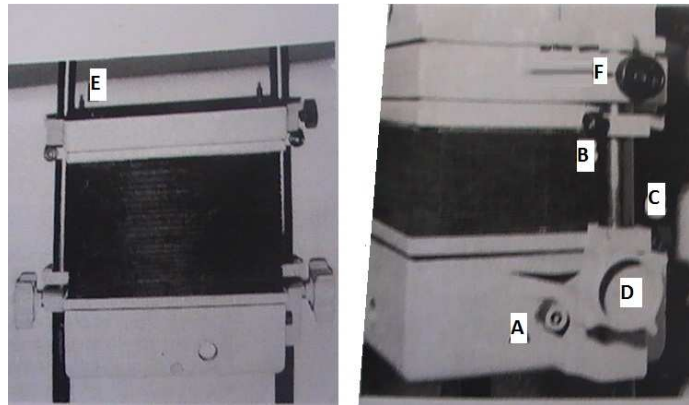


Figure A2. 3: Le carter à chaîne-dessin

### A2.3.2. Montage de la chaîne-dessin:

1. Poser la chaîne sur le tambour et raccorder avec le dernier axe (figure A2.4.a).
2. Lever le cadre intermédiaire avec le tambour jusqu'à ce que les pignons engrènent parfaitement
3. Fixer les vis **E** puis poser le cylindre de renvoi (figure A2.4.b).
4. Lever le carter jusqu'à ce que les pivots de centrage fixé sur l'axe du cylindre de renvoi touchent le fond du carter. Fixer les vis **A** (figure A2.3).
5. Pousser le carter des deux mains vers le bas et fixer les écrous à poignée **D** (figure A2.3). La chaîne -dessin ne doit pas être trop tendue. Suivant la longueur du rapport, on doit pouvoir constater à la main une certaine flexibilité de la chaîne.
6. Synchroniser le dispositif de la formation de la foule avec le dispositif de tissage

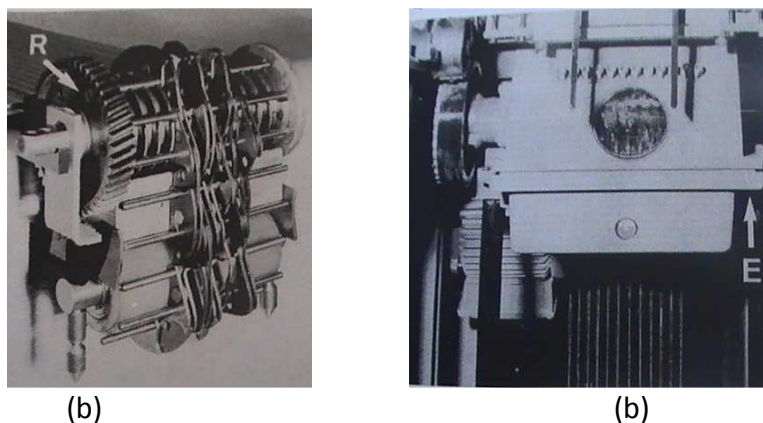
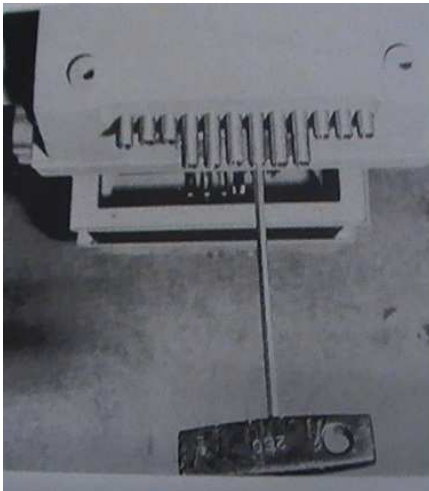


Figure A2. 4: Montage chaîne-dessin

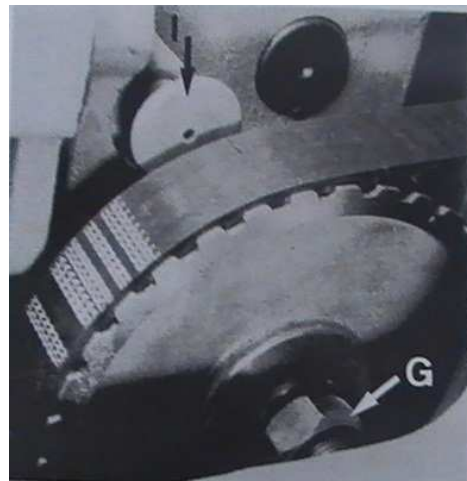
### A2.3.3. Synchronisation du dispositif de la formation de la foule:

La synchronisation du dispositif de la formation de la foule avec le dispositif de tissage est effectuée en suivant les procédures suivantes:

1. Mettre les lames en position de travail, en desserrant les vis avec la clé BTR (figure A2. 5.a)
2. En enfonçant ces vis, les lames arrivent en position haute, hors service.
3. En desserrant ces vis, les lames arrivent en position de travail.
4. Tourner la machine à la main en position de foule ouverte et peser sur la cheville index **I** (figure A2. 5.b)
5. Une fois la cheville index engrenée, desserrer l'écrou **G**
6. Continuer de tourner la machine (le dispositif de tissage) jusqu' à  $160^{\circ}$ .
7. Dans la position prescrite coupler le dispositif de la formation de la foule en resserrant la vis **G**
8. Libérer la cheville index **I** en tournant la machine un peu en arrière
9. Contrôler les lames: les lames doivent se croiser à  $340^{\circ}$  (milieu de la foule)



(a)



(b)

Figure A2. 5: Synchronisation du dispositif

#### A2.4. Guide de montage de chaîne-dessin pour les tissus étudiés

- Le dispositif de formation de la foule dans la machine de tissage de rubans « **CNE** » est composé des chaîons de chaîne-dessin.
- La transformation des maillons et des axes en chaîne-dessin s'effectuée suivant un dessin graphique appelé « guide de montage des maillons de chaîne d'armure » qui dépend sur la répartition des lames dans le métier à tisser.
- La répartition des lames est en forme « V », où les lames No. 1, 3, 5, 7, 9, et 11 sont placées à gauche du centre et les lames No. 2, 4, 6, 8,10, et 12 à droite.
- Le rapport de chaîne-dessin est égal au nombre de rangées de chaîne-dessin, qui est limité entre 16 et 44 axes.
- Le rapport de chaîne-dessin correspondant à notre tissu est calculé comme suit:

Ce rapport est un multiple du nombre de lames du métier, et il est compris entre 16 et 44 pour le métier CNE. Donc, dans notre cas, ce rapport est égal à :  $2 \times 12 = 24$  ou  $3 \times 12 = 36$ . Nous avons choisi un rapport de 24.

Les figures suivantes (figures A2.6 à A2.14) illustrent le guide de montage des maillons de chaîne d'armure pour chaque tissu étudié, sachant que le tissu A avec le liage L1 est désigné par A1, et le tissu A avec le liage L2 est désigné par A2 et ainsi de suite.

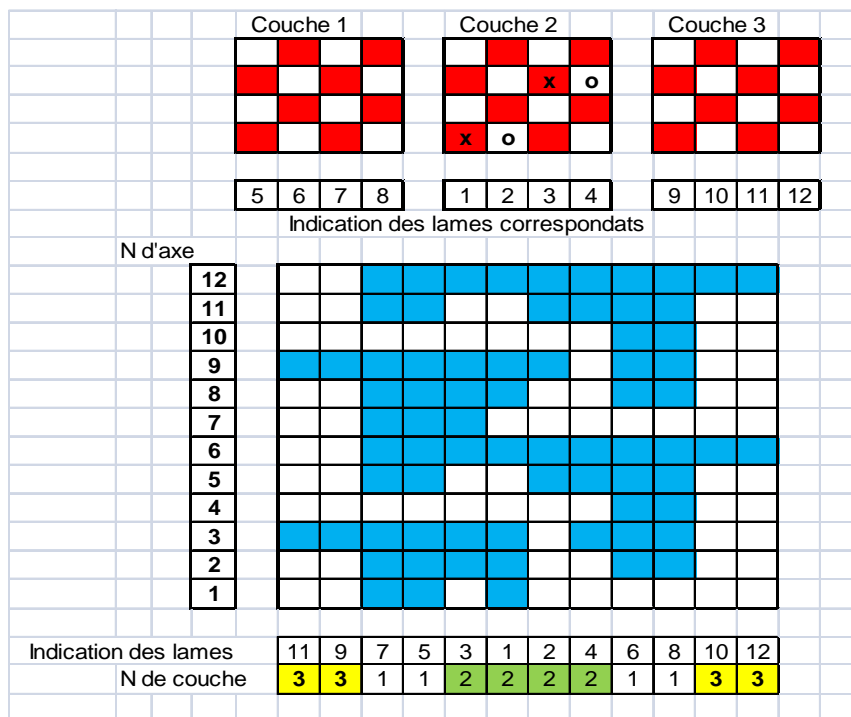


Figure A2. 6: Guide de montage de chaîne d'armure – Tissu « A1 »

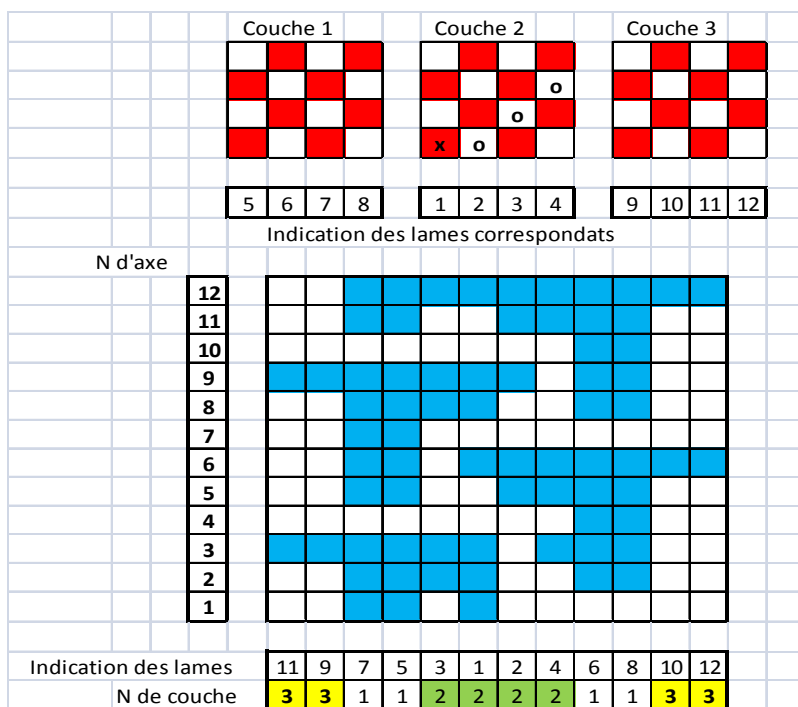


Figure A2. 7: Guide de montage de chaîne d'armure – Tissu « A2 »

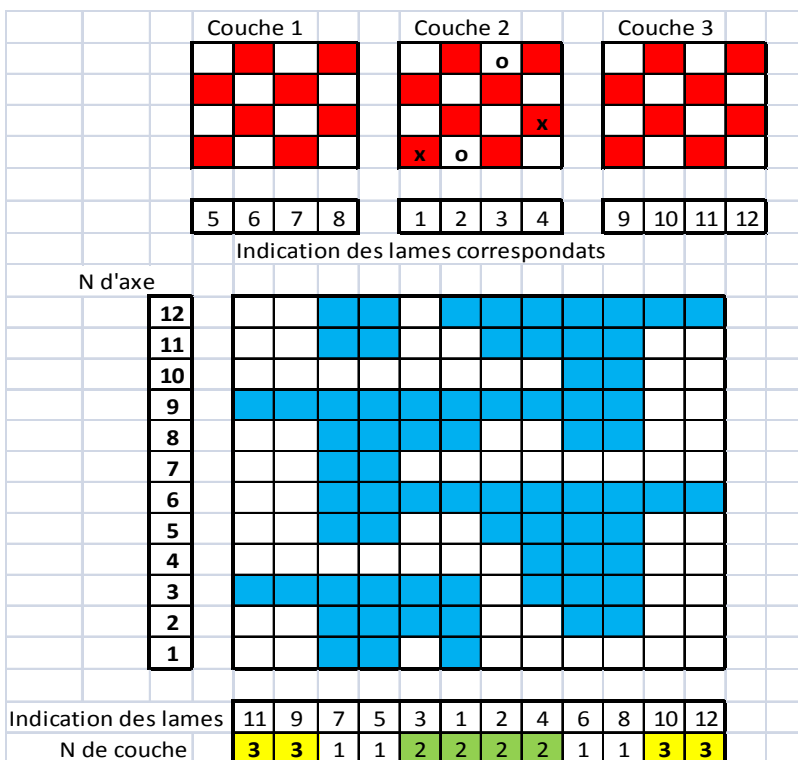


Figure A2. 8 : Guide de montage de chaîne d'armure – Tissu « A3 »

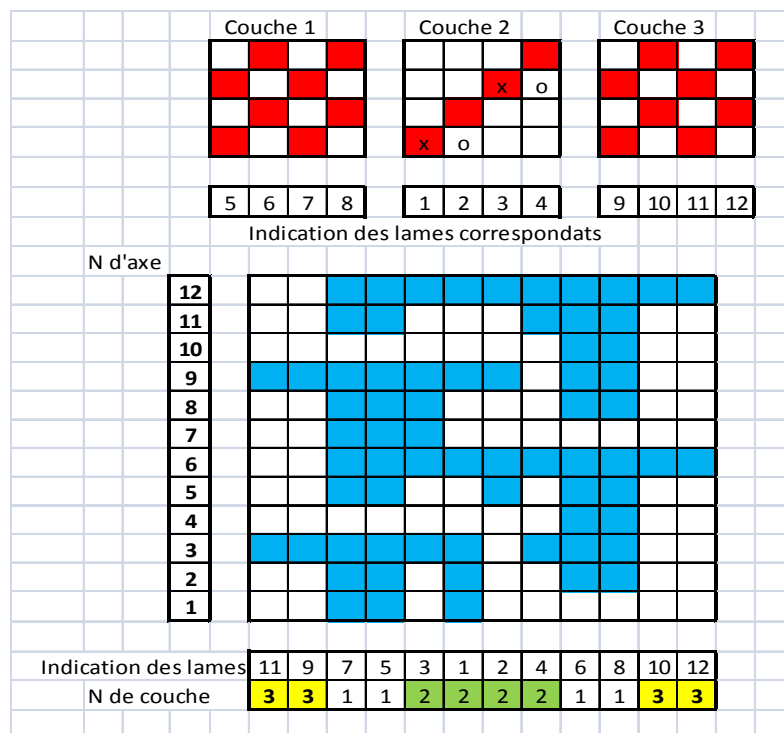


Figure A2. 9: Guide de montage de chaîne d'armure – Tissu « B1 »

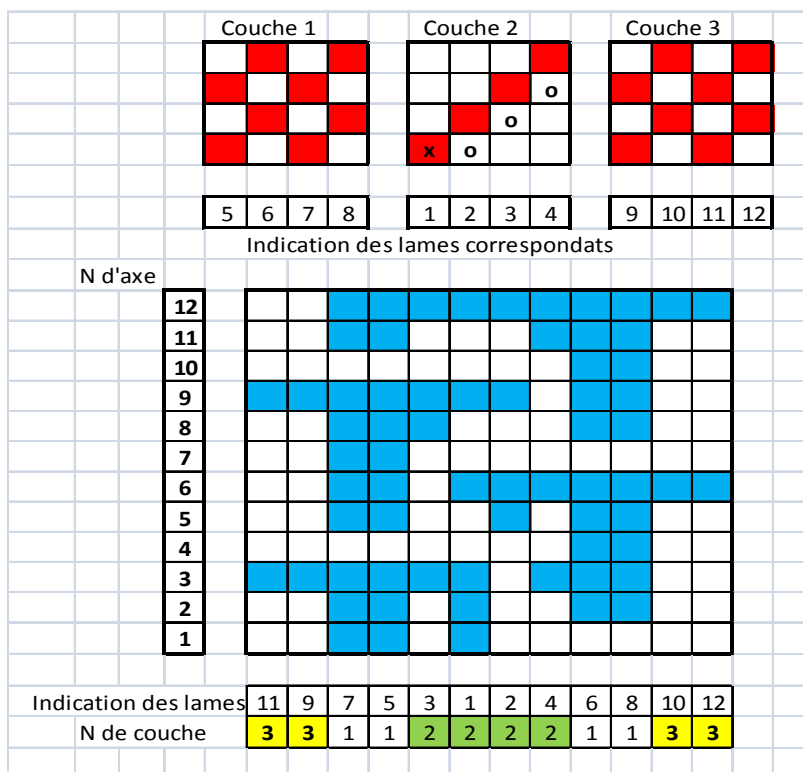


Figure A2. 10: Guide de montage de chaîne d'armure – Tissu « B2 »

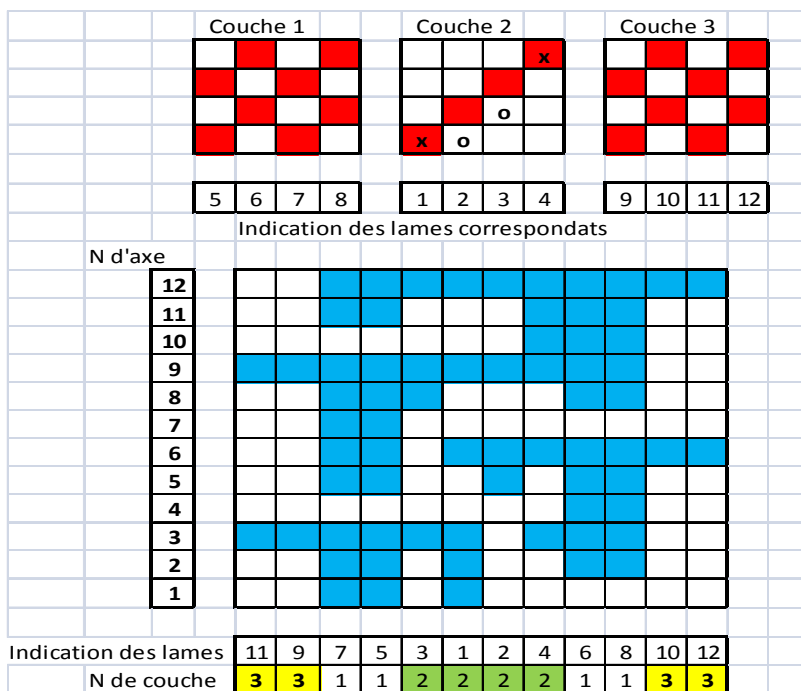


Figure A2. 11: Guide de montage de chaîne d'armure – Tissu « B3 »

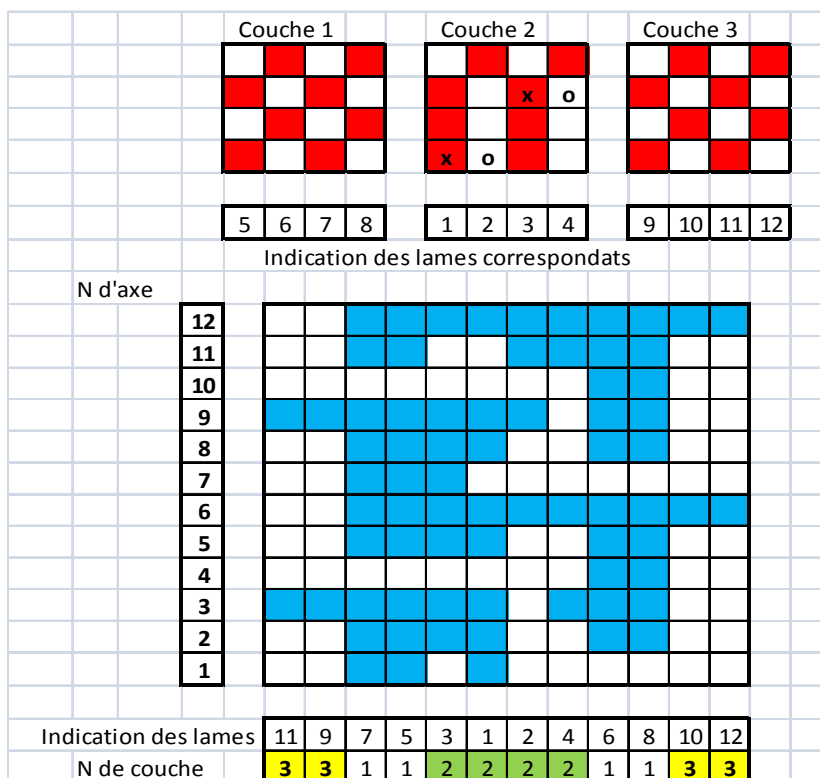


Figure A2. 12: Guide de montage de chaîne d'armure – Tissu « C1 »

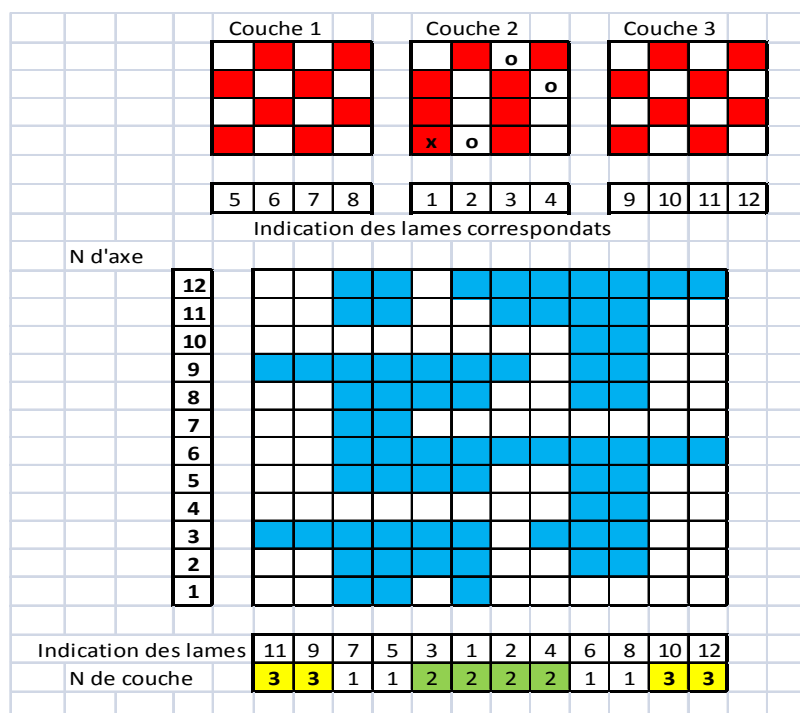


Figure A2. 13: Guide de montage de chaîne d'armure – Tissu « C2 »

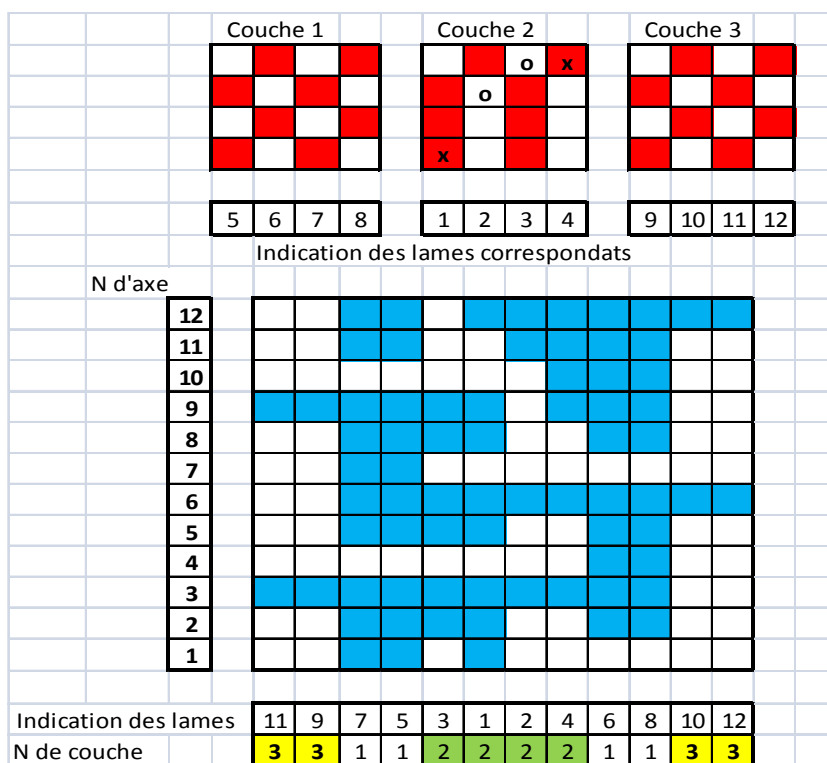


Figure A2. 14: Guide de montage de chaîne d'armure – Tissu « C3 »

# **ANNEXE 3**



Tableau 1 : Les mesures d'embuvage et de retrait

		A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
E %	Couche1	2,1	1,8	1,9	2,0	1,5	1,9	3,1	1,9	3,3
	Couche 2	2,2	2,4	2,4	2,3	1,2	1,7	1,9	1,7	2,2
	Couche 3	2,3	2,4	2,7	1,9	1,9	1,8	4,9	3,9	4,1
	Moyen	2,2	2,2	2,3	2,1	1,6	1,8	3,3	2,5	3,2
	CV%	0,31	0,35	0,42	0,35	0,44	0,30	1,27	1,03	0,83
R %	Couche 1	1,9	2,7	3,2	2,6	3,1	1,4	3,4	2,0	2,8
	Couche 2	1,7	2,7	3,6	2,3	2,5	1,2	3,0	2,2	2,9
	Couche 3	1,5	2,7	3,0	2,4	2,9	0,7	3,2	2,0	2,5
	Moyen	1,7	2,7	3,3	2,4	2,8	1,1	3,2	2,1	2,8
	CV%	0,57	0,39	0,50	0,64	0,73	0,52	0,57	0,44	0,49

Tableau 2: Masses surfaciques mesurées et calculées théoriquement

	A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
Masse surfacique mesurée (g/m <sup>2</sup> )	404,42	449,42	496,89	444,95	490,58	402,18	489,24	404,45	450,19
CV %	1,14	0,86	1,28	1,06	0,92	1,25	1,33	0,72	1,90
Masse surfacique théorique (g/m <sup>2</sup> )	400,86	442,01	483,24	441,19	480,41	398,98	485,39	402,20	444,59

Tableau 3: Les mesures Perméabilité

	A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
Perméabilité (l/m <sup>2</sup> /s)	753	616	392	676	509	895	465	853	612
CV%	3,63	4,72	5,82	4,33	3,71	3,41	4,20	4,52	3,43

Tableau 4 : Test de compression

		A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
Épaisseur (mm)	Moy	1,125	1,272	1,264	1,235	1,315	1,227	1,450	1,437	1,441
	CV%	3,39	3,98	3,81	3,52	2,54	3,10	2,31	2,22	3,26
Energie de compression (gf.cm/cm <sup>2</sup> )	Moy	0,333	0,402	0,330	0,445	0,408	0,510	0,482	0,534	0,478
	CV%	12,33	8,82	19,83	13,64	7,54	6,44	9,90	9,12	14,58
Résilience (%)	Moy	38,39	37,15	35,63	48,33	44,57	51,14	33,74	38,18	35,32
	CV%	9,38	8,47	16,78	8,88	6,70	5,40	5,31	9,62	8,36
Compressibilité (%)	Moy	21,35	22,75	17,39	19,73	18,72	22,93	21,29	26,89	24,69
	CV%	9,31	13,24	12,90	11,44	8,41	8,35	6,52	5,56	8,68

Tableau 5 : Les mesures de test de flexion

		A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
CV%	chaîne	2,34	2,46	2,99	2,80	4,74	3,87	3,14	4,65	3,45
	Trame	2,59	2,85	2,40	2,89	3,00	3,80	2,28	7,30	3,17
B (µN.m)	chaîne	383,56	635,01	1047,70	539,06	739,90	326,41	648,57	236,47	417,07
	Trame	353,04	587,33	891,13	468,98	620,40	416,52	670,91	351,23	617,94
E (Mpa)	chaîne	3,233	3,703	6,226	3,434	3,905	2,120	2,553	0,956	1,673
	Trame	2,975	3,425	5,295	2,988	3,274	2,706	2,641	1,420	2,478

Tableau 6 : Rigidité de cisaillement (cN/cm.deg)

			A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
Kawabata	Chaîne	Moy	0,422	0,609	0,843	0,511	0,631	0,384	0,605	0,377	0,473
		CV%	5,09	2,50	1,59	3,12	4,26	3,06	3,18	3,55	4,57
	Trame	Moy	0,406	0,596	0,808	0,498	0,605	0,384	0,619	0,381	0,464
		CV%	6,79	3,73	4,08	6,19	2,49	3,06	4,20	2,89	4,45
Bias Extension Test		Moy	0,202	0,315	0,668	0,246	0,416	0,136	0,610	0,161	0,332
		CV%	28,21	27,02	15,88	15,70	12,38	16,54	13,83	22,00	14,11

Tableau 7 : Angle de blocage

	A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
Angle de blocage	41,61°	40,63°	35,10°	45,73°	45,73°	39,67°	43,63°	43,63°	37,8°

Tableau 8: Étude dynamométrique

			A1 16	A2 20	A3 24	B1 20	B2 24	B3 16	C1 24	C2 16	C3 20
F rupt (kN)	Chaîne	Moy	13,2	13,4	12,6	12,2	12,8	12,1	11,8	12,2	11,7
		CV%	1,5	2,5	2,5	2,8	2,9	3,4	2,9	1,9	3,2
	Trame	Moy	10,4	13,9	15,5	11,9	13,7	10,4	15,3	10	12,5
		CV%	1,7	1,5	2,3	6,5	5,2	2,1	0,9	3,2	2
Contrainte rupt (Mpa)	Chaîne	Moy	131,8	133,8	125,9	122,2	128,2	120,7	118,4	121,9	117
		CV%	1,5	2,5	2,5	2,8	2,9	3,4	2,9	1,9	3,2
	Trame	Moy	103,8	138,6	154,9	119,1	137,7	103,8	152,6	100,3	125,4
		CV%	1,7	1,5	2,3	6,5	5,2	2,1	0,9	3,2	2
All max (%)	Chaîne	Moy	22,4	23,3	23,9	23,3	22,1	22,9	24,5	23,8	24,3
		CV%	1,5	5,6	4,00	2,8	1,6	3,7	2,5	3,4	3,6
	Trame	Moy	24,2	24,5	30	23,4	24,6	23,6	31,6	25,5	28,9
		CV%	1,9	1,5	3,5	5,2	6	2,3	4	1,8	3,7
Energie rupt (J)	Chaîne	Moy	239,8	262,8	261	238,1	231,5	236,7	249,7	240,2	239,3
		CV%	2,9	10,1	10,1	4,8	4,7	5	5,6	7,8	8,1
	Trame	Moy	210,5	300,9	414,8	227,1	271,4	197,3	463,5	222,9	332,5
		CV%	3,3	4,2	7,9	11,4	12,8	5,6	7	4,2	6,5
Module d'Young (Mpa)	Chaîne	Moy	3,4	3,9	3	2,1	2,8	3,1	2,5	2,8	2,6
		CV%	4	2,7	1,8	5	7,5	3,8	5,4	5,6	4,3
	Trame	Moy	3,	3,9	3,2	2,7	2,8	2,3	3,2	2,5	3,1
		CV%	4,9	3,3	2,4	4,1	5,3	4,8	2,5	5,7	3,2

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15	Y16	Y17	Y18	Y19	Y20	Y21	Y22	Y23
1 ---	13,18	10,38	22,4	24,2	239	210	383	353	3,23	2,97	0,42	0,41	752	2,1	2,2	2,3	1,9	1,6	1,5	-15,	-8,	1,125	404,4
2 -00	13,38	13,86	23,3	24,4	262	300	635	587	3,70	3,42	0,61	0,6	616	1,8	2,4	2,4	2,7	2,7	2,7	-13,	-7,2	1,272	449,4
3 ---	12,6	15,49	23,9	30,0	281	414	1047	891	6,22	5,29	0,84	0,81	391	1,9	2,4	2,7	3,2	3,6	3	-12,	-7,5	1,284	496,8
4 0-0	12,22	11,91	23,2	23,4	238	227	539	468	3,43	2,98	0,51	0,5	678	2	2,3	1,9	2,6	2,3	2,4	-15,	-7,5	1,235	444,9
5 00+	12,82	13,78	22,0	24,5	231	271	739	600	3,90	3,27	0,63	0,61	509	1,5	1,2	1,9	3,1	2,5	2,9	-13,	-8,6	1,315	490,5
6 0+-	12,07	11,91	22,9	23,4	236	197	326	416	2,12	2,70	0,38	0,36	894	1,9	1,8	1,8	1,4	1,2	1,7	-15,	-8,7	1,227	402,1
7 ---	11,84	15,27	24,4	31,6	249	463	648	670	2,55	2,64	0,59	0,62	464	3,1	1,9	4,9	3,4	3	3,2	0	0	1,45	459,2
8 +0-	12,2	10,03	23,8	25,5	240	222	236	351	0,95	1,42	0,38	0,38	652	1,9	1,7	3,9	2	2,2	2	0	0	1,436	404,4
9 +-0	11,7	12,54	24,3	28,9	239	332	417	617	1,67	2,47	0,47	0,46	612	3,3	2,2	4,1	2,6	2,9	2,5	0	0	1,441	450,1

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15	Y16	Y17	Y18	Y19	Y20	Y21	Y22	Y23
Y1	Traction - chaîne											Y13	Perméabilité									
Y2	Traction - trame											Y14	Embuvaage - couche 1									
Y3	Allongement - chaîne											Y15	Embuvaage - couche 2									
Y4	Allongement - trame											Y16	Embuvaage - couche 3									
Y5	Énergie - chaîne											Y17	Retrait - couche 1									
Y6	Énergie - trame											Y18	Retrait - couche 2									
Y7	Flexion - chaîne											Y19	Retrait - couche 3									
Y8	Flexion - trame											Y20	Variations dimensionnelles après relaxation - chaîne									
Y9	Module Young - chaîne											Y21	Variations dimensionnelles après relaxation - trame									
Y10	Module Young - trame											Y22	Épaisseur									
Y11	Cisaillement - chaîne											Y23	Masse surfacique									
Y12	Cisaillement - trame																					

Figure A3.1 : Tableau de résultats sur le logiciel JMP

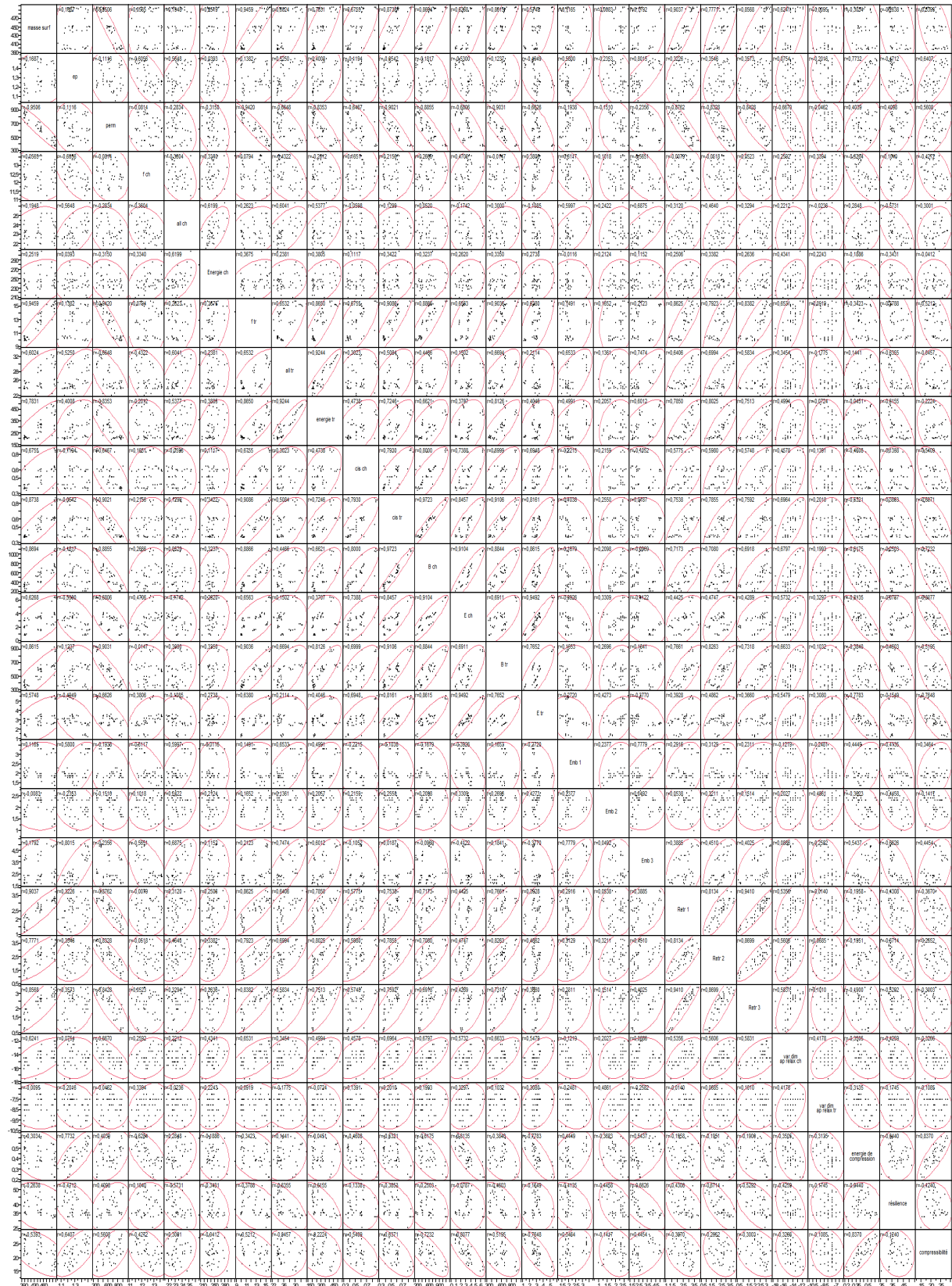


Figure A3.2 : Tableau de corrélation, nuages de points

## Lexique

<b>Armure :</b>	Désignation du mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame.
<b>CAAO :</b>	Désigne la <b>C</b> onception d' <b>A</b> rmure <b>A</b> ssistée par <b>O</b> rdinateur.
<b>CFTAO :</b>	Désigne la <b>C</b> onception et la <b>F</b> abrication de <b>T</b> extile <b>A</b> ssistées par <b>O</b> rdinateur.
<b>Chaîne :</b>	Ensemble des fils parallèles au sens d'avancement du tissu en cours de fabrication. Les fils de chaîne se désignent également par le mot « fils »
<b>Compte :</b>	Synonyme de nombre de fils de chaîne par cm
<b>CTAO :</b>	Désigne la <b>C</b> onception de <b>T</b> extile <b>A</b> ssistée par <b>O</b> rdinateur.
<b>Décochement :</b>	Décalage des points de liage en passant d'un fil de chaîne au suivant ou d'une duite à la suivante
<b>Décochement horizontale :</b>	Décochement égal au nombre de fils de chaîne à compter à partir d'un point de liage, soit à droit, soit à gauche, pour trouver sur la duite suivante le point de liage le plus proche.
<b>Décochement vertical :</b>	Décochement égal au nombre de duites à compter à partir d'un point de liage, soit à droit, soit à gauche, pour trouver sur le fil de chaîne suivant le point de liage le plus proche.
<b>Décomposition :</b>	Analyse d'un tissu en vue de déterminer les éléments nécessaires pour les reproduire.
<b>Duitage :</b>	Synonyme de nombre de duites par cm.
<b>Embuvage :</b>	Différence entre la longueur d'un fil de chaîne extrait d'un tissu et tendu, et la longueur que ce même fil occupait dans le tissu. L'embuvage s'exprime en pourcentage par rapport à la longueur du fil de chaîne dans le tissu
<b>Ensouple :</b>	Rouleau sur lequel on enroule des nappes de fils pour tissage ou tricotage.
<b>Envergeage :</b>	Opération qui consiste à disposer l'enverjure sur une chaîne de tissage.
<b>Étoffe :</b>	Désigne les surfaces textiles destinées à usage d'habillement ou d'ameublement.
<b>Fibre :</b>	Élément de matière textile de longueur réduite utilisé pour filature ou pour les non-tissés.
<b>Filament :</b>	Élément unitaire, de très grande longueur, d'un fil continu.
<b>Flotté :</b>	Bride flottante en chaîne ou en trame comprise entre deux pris de l'armure
<b>FTAO :</b>	Désigne la <b>F</b> abrication de <b>T</b> extile <b>A</b> ssistée par <b>O</b> rdinateur.
<b>Jacquard (étoffe) :</b>	Étoffe présentant des dessins complexes réalisés au moyen d'une mécanique sur machine à tisser ou à tricoter; synonyme de façonné; * toutes utilisations.
<b>Jacquard (mécanique) :</b>	Mécanique permettant la fabrication des tissus façonnés, du nom de son inventeur Joseph-Marie Jacquard (1752-1834).
<b>Laissé :</b>	Passage du fil de chaîne en-dessous de fil de trame.
<b>Laize :</b>	Largeur du tissu y compris les lisières

<b>Largeur au peigne :</b>	Largeur totale du tissu mesurée au peigne du métier à tisser.
<b>Lisières :</b>	Série de fils formant la bordure du tissu de chaque côté de sa largeur
<b>Lisse :</b>	Les lisses sont des organes de métier à tisser permettant d'obtenir le mouvement des fils de chaîne avec la trame suivant un ordre déterminé.
<b>Multi filament :</b>	Fil constitué de plusieurs filaments de très grande longueur, avec ou sans torsion
<b>Peigne :</b>	Pièce de machine à tisser ou à ourdir entre les dents de laquelle sont passés les fils de chaîne; sur métier à tisser, permet également de tasser la trame et de définir la densité des fils de chaîne
<b>Piquage au peigne :</b>	Opération qui consiste à passer dans un ordre déterminé, tous les fils d'une chaîne entre les dents du peigne, soit individuellement soit par groupe
<b>Pris :</b>	Passage du fil de chaîne au-dessus du fil de trame.
<b>Rapport d'armure :</b>	Nombre de fils de duites nécessaires à la reproduction de l'armure
<b>Rentrage ou remettage :</b>	Opération qui consiste à passer individuellement et dans un ordre déterminé, tous les fils d'une chaîne dans les maillons correspondants des lisses du harnais ou du corps du jacquard
<b>Retrait :</b>	Différence entre la longueur d'un fil de trame extrait d'un tissu et tendu, et la longueur que ce même fil occupait dans le tissu. Le retrait s'exprime en pourcentage par rapport à la longueur du fil de trame dans le tissu
<b>Sympathie d'armure :</b>	
<b>Tissage :</b>	Ensemble des opérations consistant à entrecroiser des fils pour réaliser des tissus.
<b>Tissu :</b>	Article textile, formée par l'entrecroisement perpendiculaire des fils de chaîne et de trame sur un métier à tisser.
<b>Titre d'un fil :</b>	Masse en gramme d'un kilomètre de fil, désigné sous le nom « Tex »
<b>Torsion :</b>	La torsion d'un fil est le sens dans lequel il a été filé ou retordu. Il existe deux types de torsion, torsion en Z et en S
<b>Torsion « S » :</b>	Le fil est filé ou retordu dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.
<b>Torsion « Z » :</b>	Le fil est filé ou retordu dans le sens des aiguilles d'une montre.
<b>Trame :</b>	Ensemble des fils perpendiculaires à la chaîne. Les fils de trame se désignent également par le mot « duites » lorsqu'ils sont insérés dans le tissu.