



HAL
open science

Etude du tissage de filaments de très faibles diamètres : conception d'une machine de micro tissage

Fadi Farra

► **To cite this version:**

Fadi Farra. Etude du tissage de filaments de très faibles diamètres : conception d'une machine de micro tissage. Autre. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2009. Français. NNT : 2009MULH3078 . tel-00718527

HAL Id: tel-00718527

<https://theses.hal.science/tel-00718527>

Submitted on 17 Jul 2012

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.

THESE

Présentée à :

L'UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR EN GENIE MECANIQUE

Par

Fadi FARRA

Etude du tissage de filaments de très faibles diamètres :
conception d'une machine de micro tissage

Soutenance le 21 décembre 2009 à Mulhouse devant le jury d'examen:

Pr : Jean RENAUD

RAPPORTEUR

Pr : Manuel Jose DOS SANTOS SILVA

RAPPORTEUR

Dr : Cyriaque GENET

EXAMINATEUR

Dr : Jean Christophe BARET

EXAMINATEUR

Dr : Jean François OSSELIN

CODIRECTEUR DE THESE

Pr : Jean Yves DREAN

DIRECTEUR DE THESE

Dédicaces

À mes parents et mes frères

Pour votre amour, votre patience et votre générosité ; pour tous les efforts que vous avez consentis en ma faveur. J'espère avoir été digne de votre affection et de votre confiance. Je vous dédie ce travail en témoignage de ma grande reconnaissance et de mon éternel amour. Que Dieu vous donne longue vie et bonne santé. En témoignage de mon grand amour et de ma tendre affection ; soyez assurés de ma profonde gratitude et de ma sincère reconnaissance pour le soutien moral et matériel que vous m'avez généreusement offert.

Fadi FARRA

Remerciements

Il m'est très agréable de remercier vivement le professeur Jean RENAUD et le professeur Manuel Jose DOS SANTOS SILVA, d'avoir accepté de m'honorer par leur présence dans le jury qui examinera ce travail et de leur exprimer mes sincères sentiments de respect.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance quant à la collaboration de Messieurs Jean-Christophe BARET et Cyriaque GENET de l'Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires (ISIS) de l'Université de Strasbourg pour leur grande disponibilité et leurs précieux conseils.

J'associe également à ces chaleureux remerciements le professeur Thomas EBBESEN pour son chaleureux accueil, son soutien infaillible et sa collaboration fructueuse.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements et à exprimer ma profonde gratitude envers le professeur Jean Yves DREAN et Monsieur Jean François OSSELIN pour la grande qualité de leur encadrement et leur soutien scientifique.

Table des matières

Introduction	1
1. Technologie du tissage	6
1.1. Principe du tissage	6
1.2. Principe de la machine à tisser	7
1.3. L'armure	9
1.3.1. Les armures fondamentales.....	10
1.3.2. Les armures dérivées ou composées.....	12
1.3.3. Les armures complexes.....	13
1.4. La préparation au tissage.....	15
1.4.1. Préparation chaîne.....	15
1.4.2. Préparation trame.....	16
1.4.3. Le bobinage.....	16
1.4.4. L'ourdissage	18
1.4.5. L'encollage	19
1.4.6. Le rentrage et le nouage.....	20
1.5. Les parties de la machine à tisser	21
1.5.1. Dérouleur de chaîne.....	21
1.5.1.1. Le porte-fils	21
1.5.1.2. Dispositif de régulation de la tension	22
1.5.1.3. Le casse chaîne.....	24
1.5.2. Le dispositif de formation de la foule	26
1.5.2.1. Le dispositif à cames (mécanique d'armures fondamentales).....	27
1.5.2.2. La ratière	29
1.5.2.3. La mécanique jacquard	32
1.5.3. Le système d'insertion de trame	34
1.5.3.1. Métier conventionnel à navette	36
1.5.3.2. Le projectile.....	37
1.5.3.3. La lance	38

1.5.3.4.	Le jet d'eau.....	41
1.5.3.5.	Le jet d'air.....	42
1.5.4.	Dispositif de mouvement du peigne.....	44
1.5.5.	Enrouleur du tissu	45
1.6.	L'avantage du tissage.....	47
2.	Technologie des micros systèmes électromécaniques MEMS	50
2.1.	Introduction	51
2.2.	L'effet de diminution de l'échelle.....	53
2.3.	Les matières de base utilisées pour la fabrication des MEMS	56
2.3.1.	Silicium mono cristallin	56
2.3.2.	Le poly silicium.....	56
2.3.3.	Le PDMS	57
2.3.4.	Le SU-8	57
2.4.	Le micro usinage par gravure de substrat de silicium	57
2.4.1.	Le processus de gravure isotrope humide.....	59
2.4.2.	Le processus de gravure anisotrope humide.....	61
2.5.	La méthode de micro usinage surfacique.....	63
2.6.	Le processus de micro usinage LIGA.....	65
2.7.	Le processus de micro usinage par « soft lithographie »	70
3.	Conception, réalisation et résultats	75
3.1.	La tension de fils de chaîne.....	76
3.1.1.	La tension de base	77
3.1.2.	La tension due à l'ouverture de la foule	78
3.1.3.	Le comportement mécanique du filament de cuivre	81
3.1.3.1.	La machine de mesure « UFT ».....	81
3.1.3.2.	Comportement longitudinal en mode statique : traction simple.....	82
3.1.3.3.	Comportement en mode dynamique : fatigue en traction cyclique	84
3.2.	Le dérouleur de chaîne	87
3.2.1.	Alimentation par une ensouple	87
3.2.2.	Alimentations par un cantre de bobines	89
3.3.	Le dispositif d'insertion de trame	91
3.3.1.	Système d'insertion à lance tubulaire	91

3.3.2.	Système d'insertion à lance avec une pince positive	94
3.4.	Le dispositif du mouvement de peigne.....	96
3.5.	L'enrouleur du tissu	100
3.6.	Le dispositif de formation de la foule	101
3.6.1.	Mécanique Jacquard « première idée »	104
3.6.2.	Dispositif de formation de la foule par action directe.....	106
3.6.3.	Dispositif de formation de la foule par sélection	107
3.6.3.1.	Sélection par un bloc d'actionneurs de flexion transversale.....	109
3.6.3.2.	Sélection par un bloc d'actionneurs de flexion	109
3.6.3.3.	Sélection par un bloc d'actionneurs de flexion à l'aide du peigne.....	110
3.6.4.	Dispositif de formation de la foule par sélection à l'aide d'une pince.....	111
3.6.5.	Dispositif de formation de la foule par des actionneurs micro fluidique.....	112
3.6.5.1.	Premier modèle : « Verre – PDMS – Verre »	113
3.6.5.2.	Deuxième modèle : « PDMS – PDMS – PDMS »	115
3.6.5.3.	Troisième modèle : « PDMS – Verre »	115
3.6.5.4.	Quatrième modèle : « PDMS – PDMS ».....	116
3.6.5.5.	L'effet des dimensions de l'actionneur et la forme du canal sur l'efficacité de l'actionneur	119
3.6.5.6.	Fabrication d'un bloc de multi actionneurs en seule étape	120
3.6.5.7.	Fabrication d'un bloc de multi actionneurs par assemblage.....	121
3.6.5.8.	L'alimentation de micro actionneur par l'air comprimé.....	126
3.7.	La commande de la machine à tisser	126
	Conclusions générales	132
	Références bibliographiques	136
	Liste des figures	141

Introduction

Le tissage est une technologie millénaire et on ne sait pas exactement à quelle époque l'Homme a commencé de tisser ses vêtements. AITKEM dit : « ... c'est évident que les égyptiens ont fabriqué le tissu il y a 6000 ans mais on peut croire que les européens ont pu fabriquer les filets à partir des fils depuis la préhistoire... » [LOR.92]. Tous les dessins muraux prouvent que l'Homme utilisait le tissu pour se couvrir depuis l'aube de l'humanité.

En étudiant l'histoire de l'humanité, on peut constater que le métier à tisser a été inventé plusieurs fois par plusieurs civilisations : l'empereur HUANGTI a prétendu que c'est l'empire de Chine qui a inventé le métier à tisser, mais l'histoire montre que les égyptiens l'ont inventé bien avant. Christophe COLOMB a découvert que les indiens s'habillaient en coton.

Bien plus que dans tous les autres domaines, l'accélération du développement du métier à tisser a commencé à partir de la révolution industrielle en Europe.

En 1801, le lyonnais Joseph Marie JACQUARD a construit le premier métier à tisser qui permet de réaliser un tissu avec des motifs compliqués. En effet la possibilité de commander l'entrecroisement de chaque fils de tissu selon une carte perforée permet d'automatiser le métier à tisser, de remplacer plusieurs tisserands et de réaliser de tissu avec un nombre infini de motifs possibles [AUD.08].

L'invention de la machine à vapeur par James WATT en 1776 et la création du premier haut fourneau en 1749 par WILKINSON ont permis de réaliser le premier métier à tisser motorisé en acier au début du XIX^{ème} siècle [LOR.92].

Toutes les recherches qu'ils ont été menés par la suite et jusqu'à nos jours avaient un but d'augmenter la productivité de la machine à tisser et d'améliorer la qualité du tissu obtenu.

Les machines à tisser bien qu'ayant énormément progressées au cours de ces 50 dernières années (Tableau 1-1, P. 43) sont toujours fondées sur le même principe et d'autre part sont toujours destinées à tisser des fils classiques (diamètre de 0,3 mm à quelques millimètres) que ce soit pour des applications de type habillement ou de type technique.

L'application des micros puis nanotechnologie ont permis d'élaborer des fils et des filaments de diamètre de l'ordre de quelques micromètres à quelques centaines de nanomètres.

Il s'avère que des applications tissées de ces nouveaux matériaux pourrait être prometteuses. Plusieurs secteurs des sciences auraient besoin de ce type de tissu : le domaine médical (prothèse, peau artificielle, membrane,...), le domaine électronique (circuit intégré), micro filtration,...

Ces tissus présenteront une rugosité très faible par rapport aux tissus classiques et les aspérités de ces tissus devraient être plus petites que l'ordre de grandeurs d'éléments biologiques tels que les globules sanguins. Ainsi, ceux-ci ne pourraient plus être retenus dans les aspérités, ce qui pourrait être un avantage pour les tissus prothétiques synthétiques.

Par ailleurs eu égard à la micro texture de ces tissus, la porosité de ceux-ci devrait être parfaitement contrôlée et ainsi retenir des éléments tels que certaines bactéries ou virus. Ceci permettrait de réaliser des filtres de très grandes performances.

Dans le domaine de l'électronique, l'utilisation de la technique Jacquard (commande fil à fil) permettra de tisser des jonctions (point d'entrecroisement des fils) parfaitement localisées dans le plan du tissu ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications.

Le tissage des micros filaments n'est à ce jour pas possible, faute de nouvelle technologie du tissage. En effet, la réalisation d'une machine de micro tissage en transposant les mécanismes d'une machine traditionnelle à l'échelle micro (passage de macro à micro) s'avère impossible. En fait, l'ensemble des pièces ainsi réalisé ne peuvent pas répondre à leurs fonctions mécaniques. D'autres phénomènes d'adhésion liés aux forces de surface et aux forces électrostatiques deviennent importants à cette échelle et ils limitent l'utilisation de procédure de tissage traditionnelle.

Le but final de notre projet est de réaliser des « micro tissus » et de les caractériser mécaniquement. Ces « micro tissus » devront être réalisés au moyen de micro filaments (cuivre, or, polyester,...) de diamètre compris entre 10 à 25 μm , la texture du « micro tissu » pouvant atteindre 400 fils/cm.

Afin de réaliser ce projet, il sera nécessaire en tant premier lieu de montrer la tissabilité de tels filaments puis de réaliser une machine de « micro tissage » en ayant au préalable réétudié et reconçu les différentes fonctions de la machine à tisser.

Le premier chapitre est consacré à la technologie du tissage afin de présenter les étapes de la procédure de tissage depuis le fil jusqu'à l'obtention du tissu final. Durant ce chapitre on montrera les différentes possibilités d'entrecroisement des fils et les différents mécanismes de chaque partie de la machine à tisser.

Le deuxième chapitre s'attache à décrire les technologies de micro usinage qui permettent de réaliser des micro structures et de fabriquer les micro systèmes électromécaniques MEMS.

Dans le troisième chapitre on étudiera le comportement mécanique du filament de cuivre afin de vérifier sa capacité d'être tissable. On calculera la tension de fils pendant le processus de tissage afin de pouvoir concevoir les différentes parties de la machine à tisser. On testera également les systèmes de formation de la foule conçus. Nous exposerons par la suite les résultats obtenus.

La conclusion générale fera le point sur les résultats obtenus, l'ensemble des cas non traités, les motivations et les intérêts ainsi que les évolutions futures.

1. Technologie du tissage

1.1. Principe du tissage :

Définition : Le tissu est une étoffe formée par l'entrecroisement perpendiculaire de deux ensembles de fils (Figure 1-1) : cet entrecroisement est réalisé au cours du tissage sur métier ou machine à tisser [norme G.00012]. Ces ensembles de fils sont :

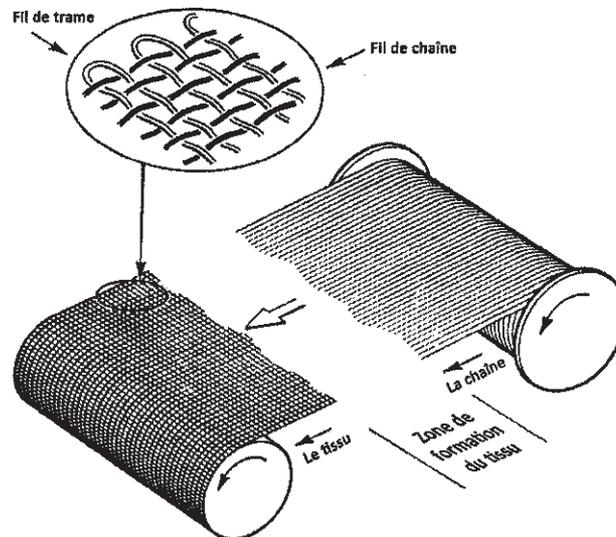


Figure 1-1 : Les fils de chaîne et les fils de trame [LOR.82]

- La chaîne dans le sens longitudinal (sens de la pièce de tissu) : c'est une nappe de fils parallèles entre eux et séparés l'un de l'autre.
- La trame dans le sens transversal : c'est un fil continu.

Pour effectuer cet entrecroisement entre les fils de chaîne et le fil de trame il est nécessaire de :

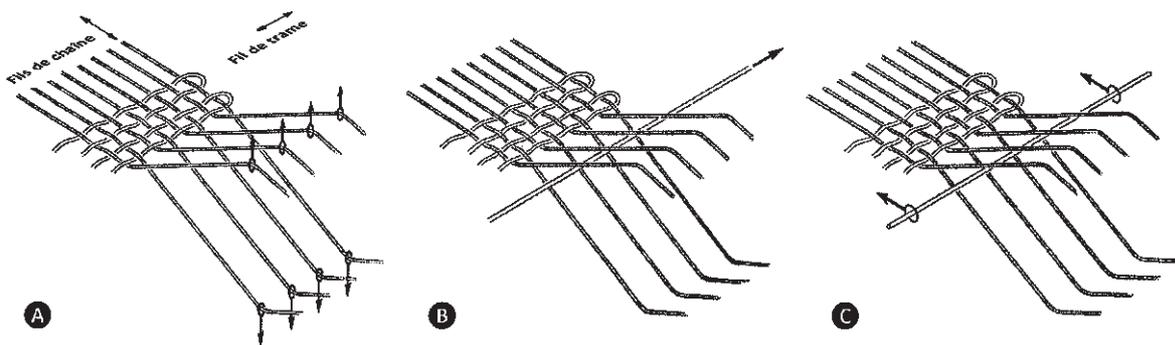


Figure 1-2 : Le principe du tissage [LOR.82]

a) Séparer l'ensemble de fils de chaîne en deux nappes (Figure 1-2, A) :

- La nappe supérieure contient tous les fils qui devront se trouver au dessus du fil de trame (la duite). Ils formeront les pris.

- La nappe inférieure contient tous les fils qui devront se trouver au dessous de la duite. Ils fermeront les laissés.

b) Insérer le fil de trame entre les deux nappes séparées (Figure 1-2, B).

c) Repousser la duite contre le tissu déjà formé pour la positionner dans le tissu (Figure 1-2, C).

Recommencer pour la duite suivante.

1.2. Principe de la machine à tisser :

Pour assurer les fonctions technologiques nécessaires au tissage, la machine doit donc pouvoir :

- Maintenir la chaîne et le tissu à une tension régulière afin de permettre l'insertion correcte de la trame.
- Séparer les fils de chaîne selon l'ordre d'entrecroisement de la chaîne et de la trame.
- Insérer la trame sur toute la largeur des fils de chaîne.
- Pousser la trame contre le tissu.
- Faire avancer régulièrement le tissu.

Afin de mieux comprendre le principe de la machine à tisser et le rôle de chacun de ses mécanismes, on va expliquer les différentes parties d'une machine à tisser (Figure 1-3) :

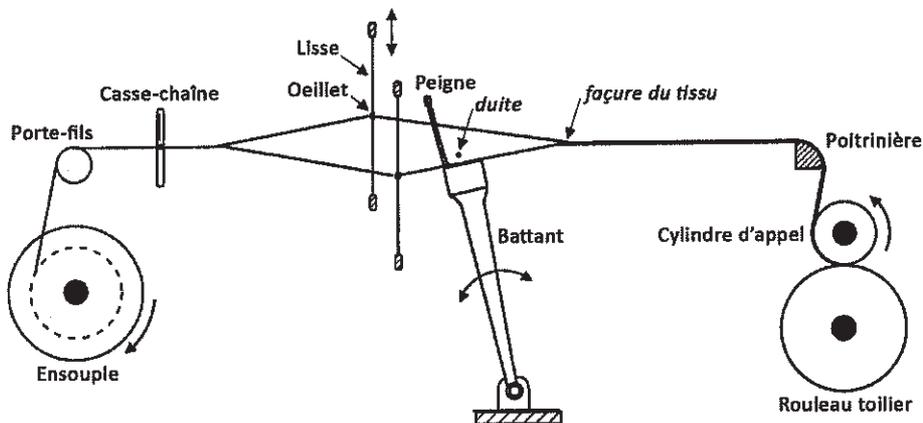


Figure 1-3 : Le principe de la machine à tisser [ADA.01]

La nappe des fils de chaîne est stockée sur l'ensouple, le dérouleur automatique fait tourner l'ensouple selon l'appel de chaîne en maintenant la tension à une valeur moyenne constante. Le porte-fils permet de dévier la nappe et la maintenir dans un plan bien déterminé. Chaque fils de la nappe est :

- passé dans un système casse-chaîne qui est chargé d'arrêter la machine lors de la rupture l'un des fils de chaîne.
- enfilé dans l'œillet d'une lisse. Les lisses sont commandées soit par une mécanique d'armure fondamentale (cames), soit par une ratière, ou par une mécanique jacquard. Le mouvement des lames permet de séparer la nappe.
- passé dans l'une des dents du peigne qui est monté sur le battant. Le mouvement de va-et-vient du battant permet à l'aide du peigne de frapper contre le tissu la duite qui vient d'être déposée.

La poitrinière est chargée de ramener le tissu dans un plan vertical. Le cylindre d'appel qui en tournant provoque l'avance régulière du tissu. La valeur de cette avance est réglable et est donnée par le régulateur de duitage qui a pour rôle de déterminer le nombre de duites par centimètre. Le rouleau toilier sert de magasin de tissu.

Selon le type de la machine à tisser le système d'insertion de trame peut varier, ce système permet de poser le fil de trame dans l'espace formé entre le peigne et les deux nappes séparées (la foule). Le casse-trame est chargé d'arrêter la machine en cas de rupture de trame.

Malgré les différents mécanismes qu'on peut trouver sur une machine à tisser moderne, on peut constater qu'il y a cinq mécanismes qui sont essentiels à la réalisation du tissage : (ils seront détaillés ultérieurement) :

1. Dérouleur de chaîne
2. Formation de la foule
3. Insertion de trame
4. Mouvement du peigne
5. Enrouleur du tissu

Généralement, tous ces mécanismes sont entraînés par le seul moteur de la machine à tisser afin qu'ils soient synchronisés entre eux. La figure 1-4 montre l'ordre de succession des opérations sur un métier à tisser à navette et le temps nécessaire pour chaque opération représentée par nombre de degré de rotation de l'arbre du moteur. Ce temps peut varier selon le modèle de la machine à tisser, le principe d'insertion et le type de la frappe du peigne.

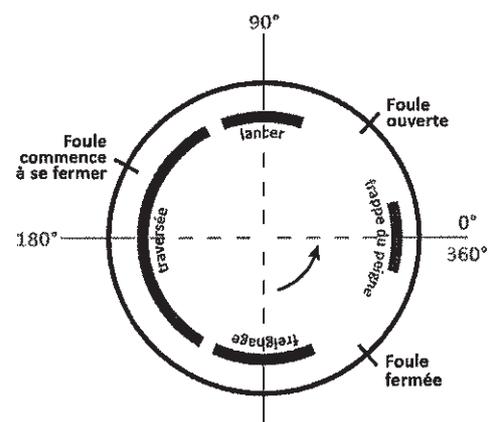


Figure 1-4 : L'ordre de succession des opérations sur un métier à tisser à navette

1.3. L'armure :

C'est l'ordre de l'entrecroisement de la chaîne et de la trame. Cet ordre est défini par la disposition des pris et des laissés.

L'armure est généralement présentée par un dessin dans lequel les colonnes verticales présentent les fils de chaîne et les rangées horizontales présentent les duites. Les colonnes sont numérotées du bas en haut et les rangées de gauche à droite. Chaque carreau dans le dessin représente l'entrecroisement entre un fil de chaîne et un fil de trame. Si le fil de chaîne passe en-dessus de fil de trame le carreau sera plein, dans le cas contraire où le fil de chaîne passe en dessous de fil de trame le carreau sera laissé vide.

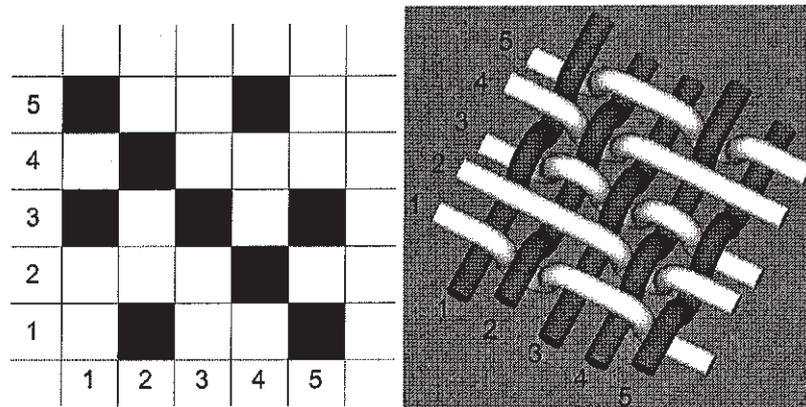


Figure 1-5 : Armure de rapport de 5

L'armure est définie par un nombre minimal de fils de chaîne (rapport en chaîne) et de fils de trame (rapport en trame) qui représente une période à partir de laquelle il y a répétition dans la structure du tissu. L'armure est donc le plus petit dessin suffisant pour identifier la structure du tissu. Le rapport d'armure R est défini par le rapport en chaîne et le rapport en trame.

Cependant, dans les cas de tissu complexe ou tridimensionnel, il est plus utile de représenter la structure du tissu en faisant des coupes dans le tissu pour montrer le profil de fils de chaîne et de trame. La figure 1-6 présente la coupe d'un tissu complexe multicouche (3 couches).



Figure 1-6 : Armure complexe [ADA.01]

Le nombre de possibilités de développer des armures différentes est pratiquement infini, ce qui permet de réaliser des tissus pour divers emplois. Ces possibilités ne sont limitées que par l'imagination du concepteur. Ceci est un avantage important que la technologie du tissage peut offrir. Les avantages de tissage seront détaillés postérieurement (Page 47).

1.3.1. Les armures fondamentales :

Malgré le nombre illimité des armures tissables, il y a trois armures fondamentales qui sont l'armure toile, l'armure sergé et l'armure satin. Ce sont les armures les plus utilisées et qui ont des aspects et propriétés mécaniques différentes. La plupart des autres armures sont dérivées de ces trois armures.

La toile :

C'est l'armure la plus petite, la plus ancienne et la plus utilisée, dans laquelle les fils impairs évoluent ensemble et les pairs ensemble, et il y a une évolution après chaque trame. Ayant une forte concentration d'entrecroisement entre les fils, cette armure est la plus solide et elle résiste le mieux à l'abrasion en raison d'avoir de fils ondulés courts (flottés courts) [LAM.48]. Mécaniquement, c'est l'armure la plus difficile à tisser car lors de la fabrication tous les fils de chaîne doivent changer de face à chaque duite.

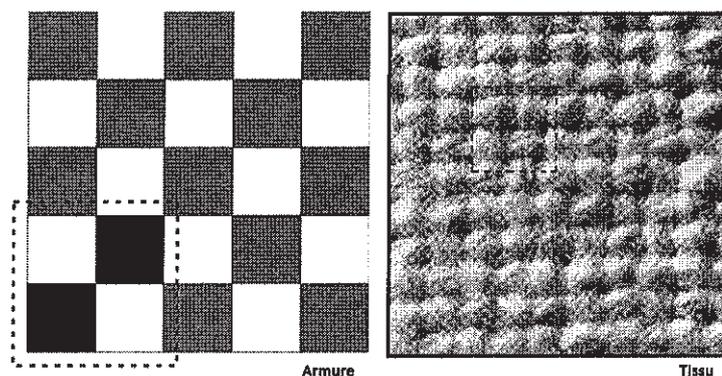


Figure 1-7 : L'armure toile, l'image du tissu est prise de [SD1.77]

Le sergé :

Le sergé est obtenu en levant un fil, dans un ordre suivi, à chaque insertion d'une duite ; pour assurer le liage entre les fils de chaîne et de trame, il y a, à chaque duite, un décochement d'un fil, de sorte qu'il y a également, sur chaque fil de chaîne, une trame prise et plusieurs laissées [LAM.48]. Le décochement se fait en décalant des pris ou des laissés en passant d'un fil de chaîne au suivant ou d'une duite à la suivante. Ce qui donne à cette

armure un aspect de côtés saillantes séparées par des sillons obliques ; si la réduction est la même pour la chaîne comme pour la trame, ces sillons sont à 45°. Sur une des faces, les côtés obliques sont formée de flottés de chaîne (effet chaîne) sur l'autre face, les côtes sont inclinées dans l'autre sens et sont formées de flottés de trame (effet trame).

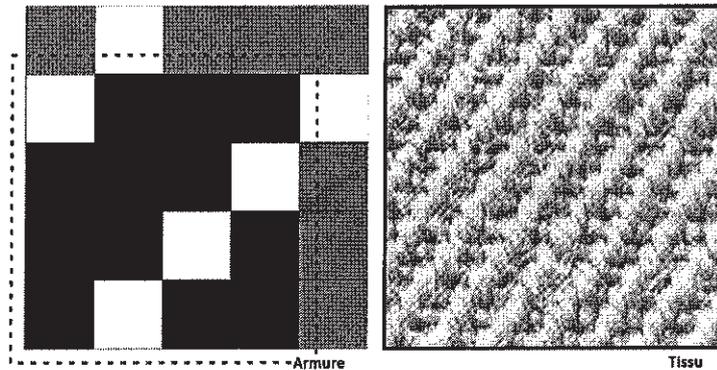


Figure 1-8 : L'armure Sergé 4 effet chaîne, l'image du tissu est prise de [SD1.77]

Le sergé peut être désigné par son rapport d'armure, son effet et son sens de côte. Dans le sergé simple le rapport ne dépasse guère 5, car un trop grand rapport donnerait un liage insuffisant et le tissu serait trop peu solide. La tenue du sergé à la couture est moins bonne que celle de la toile mais le sergé est plus souple.

Le satin :

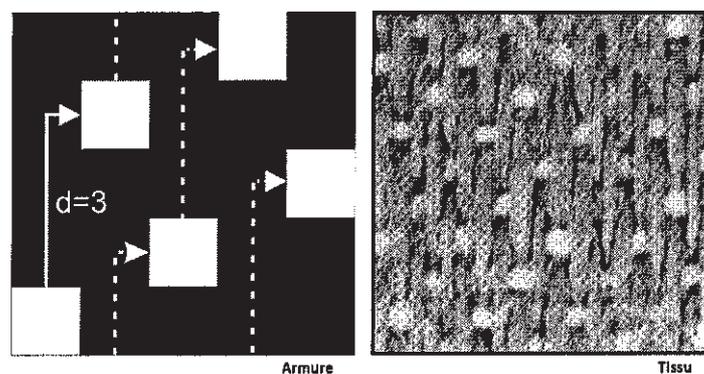


Figure 1-9 : L'armure satin 5 effet chaîne d=3, l'image du tissu est prise de [SD1.77]

Le satin est une armure présentant une surface plus ou moins brillante et souple selon les matières utilisées, il est constitué de flottés de chaîne ou de trame plus ou moins longs sans points de liage apparents. Un satin est en fait un sergé dans lequel on a changé l'ordre des duites pour rompre l'alignement des points de liage, supprimer l'effet de rayure de cet alignement et laisser la prépondérance à l'effet de flotté.

Le satin est obtenu en appliquant la méthode de décochement en chaîne de valeur d : partant d'un point de liage (généralement un laissé) existant, on place le point de liage suivant sur le fil immédiatement à droite et sur la duite placée à d rangs plus haut. Une autre méthode de décochement en trame peut être appliquée [DRE.00].

Le satin peut être désigné par son rapport d'armure, son effet et la valeur de décochement. Pour qu'un satin régulier soit tissable, il faut que le décochement n'ait pas de diviseur commun avec le rapport d'armure R et qu'il ne soit pas ni 1 ni $R-1$ (obtention de sergé).

1.3.2. Les armures dérivées ou composées :

Les procédés de dérivation ; addition, superposition, intercalation, transposition, rayonnement ; permettent d'obtenir de nouvelles armures à partir d'une ou de plusieurs armures choisies comme base [OSS.01]. L'utilisation successive d'un ou de plusieurs de ces procédés permet d'avoir un nombre quasi illimité d'armures dérivées dans lesquelles on peut citer :

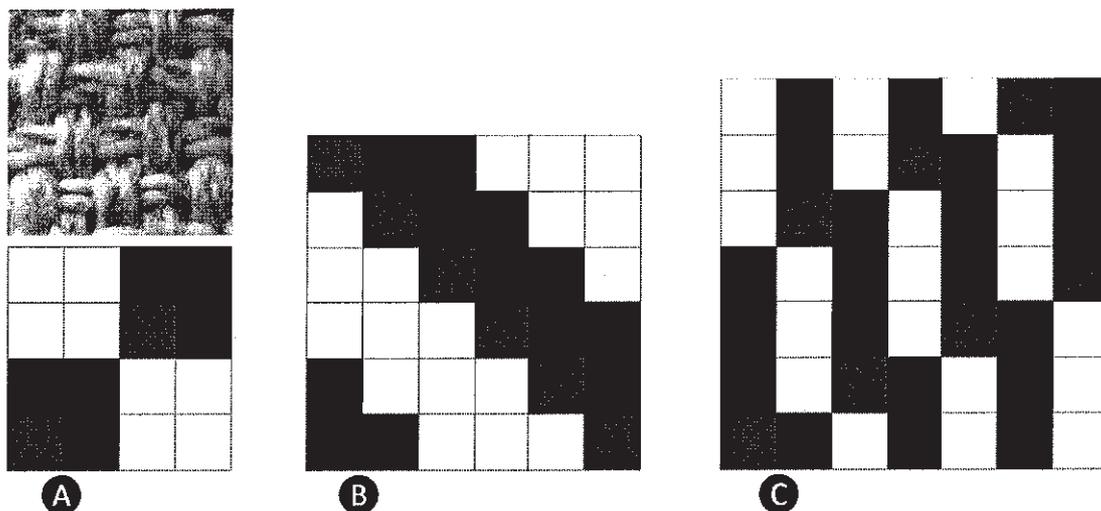


Figure 1-10 : Les armures dérivées

- Nattés : dérivée de l'armure toile par doublage des fils de chaîne et des duites (Figure 1-10, A).
- Le croisé 2/2 : dérivée de l'armure sergé en superposant une armure sergé identique avec un décalage d'un fil (Figure 1-10, B).
- Le satin cannelé : comme l'indique son nom, il est dérivé de l'armure satin en ajoutant des pris de façon à former des flottés de chaîne de hauteur voisine de $R/2$ (Figure 1-10, C).

Les armures composées sont obtenues par juxtaposition de deux ou plusieurs armures différentes. La figure suivante montre certaines armures qui peuvent être réalisées en appliquant cette méthode :

- Pékins : tissu à de bandes longitudinales de même largeur ou de largeurs différents (Figure 1-11, A).
- Bayadères : tissu à de bandes transversales de même largeur ou de largeurs différentes (Figure 1-11, B).
- Damiers : tissu à des carreaux rectangulaires ou carrés (Figure 1-11, C).

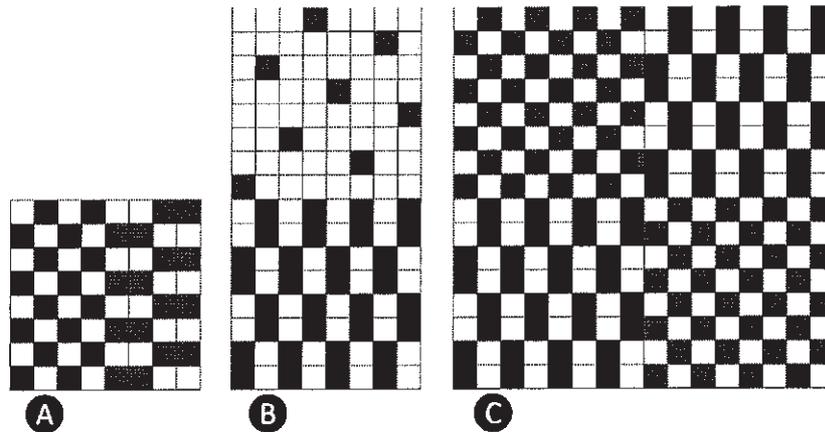


Figure 1-11 : Les armures composées

1.3.3. Les armures complexes :

Le tissu double faces :

Comme son nom l'indique ce tissu a deux faces avec deux armures différentes (Figure 1-12). Il est obtenu en juxtaposant très étroitement deux fils voisins de façon à ce qu'on puisse les recouvrir complètement l'un par l'autre. Pour réussir il faut que les pris d'armure de la première face correspondent aux laissés d'armure de la deuxième face et que les laissés d'armure de la première face correspondent aux pris d'armure de la deuxième face. Ceci s'appelle la sympathie d'armure. Le tissu complexe est formé soit par un fil de chaîne et de deux trames (double face trame) soit par une trame et deux fils de chaîne (double face chaîne).

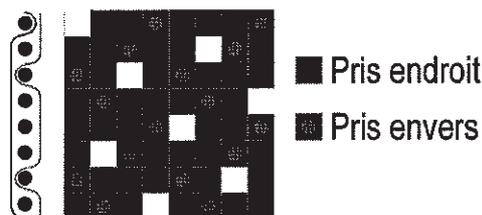


Figure 1-12 : Tissu double face

Le tissu tubulaire et le tissu à double largeur :

Le tissu tubulaire est un tissu à deux chaînes superposées et reliées entre elles sur les deux côtés par une trame continue passant dans l'une de deux chaînes en allant et dans l'autre en revenant (Figure 1-13, A). Dans le cas de tissu à double largeur les deux chaînes sont superposées et réunies d'un côté seulement, la trame va dans la première chaîne et revient par la seconde, repart par celle-ci, revient par la première et ainsi de suite (Figure 1-13, B).

N'ayant pas de contact entre les deux chaînes, la sympathie d'armure n'est pas nécessaire. Afin d'avoir une trame continue, ce type de tissu doit être fabriqué obligatoirement sur métiers à tisser navettes [DRE.00].



Figure 1-13 : A – Le tissu tubulaire, B – Le tissu à double largeur

Le tissu poche :

Le tissu poche est un tissu à deux chaînes, Il est obtenu en interrompant périodiquement le tissage tubulaire par des autres armures liant les deux chaînes et formant ainsi des poches de formats divers : longitudinales, transversales et damiers (Figure 1-14).

En général, les deux étoffes diffèrent par la qualité des filés (titre, matière, couleurs) et/ou par les armures. Par analogie au tissu tubulaire, la sympathie d'armure n'est pas nécessaire. Le ballon des coussins gonflables (airbag) est fabriqué en tissu poche en une seule pièce (grande poche) sans d'avoir besoin de couture qui présente quand à elle des points faibles dans la structure [ADA.01].

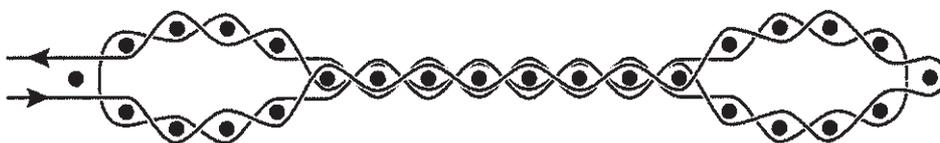


Figure 1-14 : Le tissu poche

Le tissu multicouche :

Le tissu multicouche est un tissu composé de plusieurs chaînes reliées par des points d'assemblages nombreux de façon de faire un seul tissu solide et épais. Deux méthodes

d'assemblage existent ; assemblage par ascension, assemblage par descension ; en général, les points d'assemblage doivent être invisibles de l'endroit et de l'envers.

Le tissu triple peut s'employer pour de l'habillement lourds ; entre deux tissus extérieurs dont l'un est l'endroit et l'autre l'envers, se trouve un tissu intermédiaire qui sert uniquement à donner l'épaisseur et il est fait d'un textile moins couteux (Figure 1-6). Le tissu plus que triple ne s'emploient pas pour l'habillement, ni pour l'ameublement ; ils ne servent qu'à des usages techniques (les courroies de transmission ou de transport, le renfort des matériaux composites...).

1.4. La pré paration au tissage :

La préparation au tissage a pour rôle de présenter la matière textile dans une forme appropriée au tissage, d'améliorer la qualité du produit final et d'augmenter l'efficacité du tissage en diminuant la casse des fils sur la machine à tisser. Le coût de réparation d'une casse de fil sur la machine à tisser est beaucoup plus important s'il est produit pendant les opérations de préparation.

En effet, les conditions de fabrications des fils sur les machines de filature ne sont généralement pas convenables aux processus du tissage. La taille assez faible des bobines disposées à la sortie de la filature (cops de filés), les caractéristiques de surface des filés, et d'autres facteurs rendent nécessaire la préparation des fils de chaîne et les fils de trame.

1.4.1. Préparation chaîne :

La préparation chaîne permet de :

- Avoir des fils d'une meilleure qualité possible (homogène, propre, sans défaut...) en fonction de la qualité des fils d'origine et des coûts de fabrication envisageable compte tenu du marché.
- Améliorer les propriétés mécaniques des fils tels que, la résistance aux extensions répétées (au moment d'ouverture de la foule), l'élasticité, la résistance à la rupture (dérouleuse, porte fils...) et la résistance aux abrasions (fils-fils et fils-lisses...) pour être aptes à résister aux opérations de tissage.
- Enrouler parallèlement les fils les uns à coté des autres dans une nappe homogène ayant un nombre de fils déterminé, une largeur et une longueur à l'avance donnée.

- Traiter la nappe des fils pour diminuer la pilosité de la surface des fils et augmenter leur résistance à l'abrasion.
- Rentrer les fils dans les lisses, les lamelles du casse chaîne et le peigne de la machine à tisser et leur donner la même tension.

1.4.2. Préparation trame :

La préparation trame permet de :

- Avoir des bobines de taille plus importante et plus uniforme par rapport à la taille des cops obtenus à la fin des processus de filature, ce qui permet de diminuer le nombre d'arrêt de la machine à tisser pour remplacer la bobine, faciliter la manipulation d'un petit nombre de bobine et d'augmenter l'uniformité du tissu.
- Améliorer la qualité du fil de trame, éliminer certains défauts en fonction toujours de la qualité des fils d'origine et des coûts de fabrication envisageable compte tenue du marché.
- Présenter le fil sur un support approprié au vecteur de trame du métier.

Les fils de chaîne subissent à des sollicitations importantes au cours de l'opération de tissage ce qui demande plusieurs étapes de préparation : le bobinage, l'ourdissage, la teinture sur rouleaux si nécessaire, l'encollage, le rentrage ou le nouage.

En revanche, le fil de trame ne subit pas les mêmes contraintes que les fils de chaîne, c'est pourquoi la préparation trame est plus facile et elle comporte uniquement l'opération de bobinage et, éventuellement, le cannetage pour les métiers à navette.

1.4.3. Le bobinage :

Le bobinage est une étape de transformation du fil, étape que l'on trouve habituellement au dernier stade de la filature et qui a deux buts :

- Un but économique qui consiste à transformer les cops de filature (de masse 100 g au moyenne) en une bobine de masse plus importante (entre 1 à 2 kg) qui est plus pratique à l'alimentation des opérations suivantes (teinture, ourdissage) et facilite le transport (Figure 1-15).

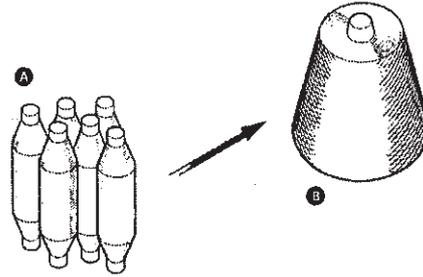


Figure 1-15 : A – Cops de filature, B – Bobine [LOR.82]

- Un but technique qui a pour objectif d'améliorer la qualité de fil en éliminant certains défauts (Figure 1-16) et en les remplaçant par des nœuds ou des épissures.

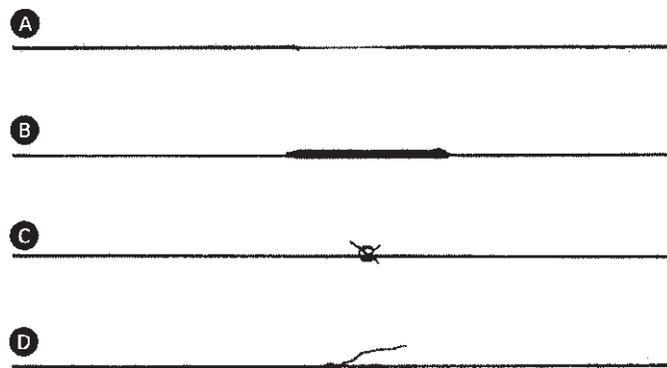


Figure 1-16 : A – faiblesse, B – grosseur, C – nep, D – poil [LOR.82]

Il faut noter que le bobinage modifie légèrement l'aspect du fil en particulier en ce qui concerne la pilosité.

Le processus de bobinage se compose de trois zones principales [BEN.06] :

1. La zone d'alimentation : elle comporte les mécanismes qui permettent le dévidage des cops de filés et de remplacer les cops vides de manière manuelle ou automatique.
2. La zone de traitement et du contrôle du fil : elle est constituée des mécanismes et des organes (guidage ou anti-ballon, tendeur, paraffineur, rattacheur, épurateur ou détecteur des défauts) nécessaires pour avoir un bobinage continu et pour obtenir une bobine de bonne qualité et avec les caractéristiques désirées.
3. La zone de réception de fil : elle comporte les mécanismes qui permettent l'envidage de la bobine selon le type d'enroulement demandé (parallèle ou croisé), et d'arrêter la machine en fonction du diamètre de la bobine et la longueur de fil bobinée.

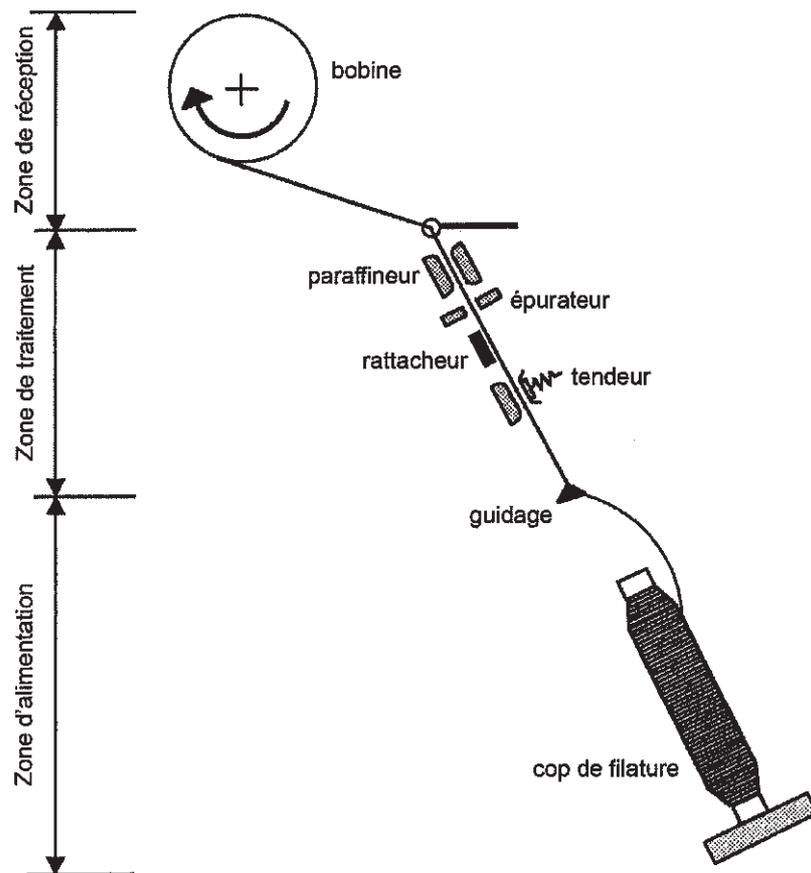


Figure 1-17 : Schéma du processus de bobinage [ADA.01]

1.4.4. L'ourdissage :

L'ourdissage est une étape de préparation au tissage nécessaire pour les fils de chaîne et qui se réalise juste après le bobinage. Elle consiste à réunir sous une même tension, parallèlement entre eux, les fils constituant la nappe de chaîne et les enrouler sur l'ensouple. L'ourdissoir (Figure 1-18) est composé de deux parties :

- Le « cantre » : c'est le support des bobines.
- L'ourdissoir proprement dit qui est l'organe moteur.

Compte tenu du matériel d'ourdissage et de certaines exigences techniques, on peut faire des nappes de quelques centaines de fils.

Il est clair que, contrairement au bobinage, aucun traitement technique sur le fil n'est effectué au cours de l'opération de l'ourdissage. A première vue, il semble préférable d'alimenter la machine à tisser à partir d'un cantre comportant autant des bobines qu'il y a de fils dans la nappe. L'ourdissage n'aurait donc plus de raison d'être. Cette idée est absolument rejeter puisqu'elle cause un grand problème de qualité. En effet, le contrôle de la régularité de la tension de quelques milliers des fils de chaîne est quasi impossible.

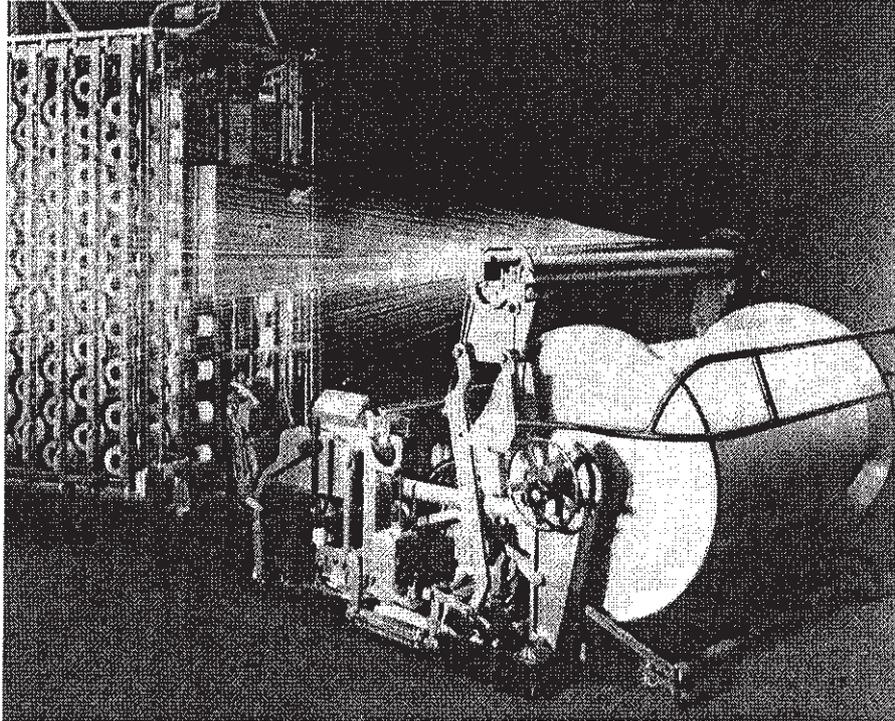


Figure 1-18 : Ourdissoir [SD1.77]

1.4.5. L'encollage :

Au cours de ces dernières années, l'évolution des vitesses des machines à tisser a imposé la préparation d'une chaîne de grande qualité.

L'encollage est un apprêt passager appliqué au fils de chaîne après l'ourdissage et avant le tissage. Il a pour but d'améliorer la qualité des fils en augmentant :

- La tenue aux extensions répétées
- La capacité de travail (sans perdre en élasticité)
- La résistance à l'abrasion

et en diminuant la pilosité et le coefficient de frottement du fil.

L'encollage doit aussi être éliminé facilement, après le tissage, lors des opérations de préparation à la teinture ou de délavage.

L'encolleuse (Figure 1-19) est constituée généralement des parties suivantes : le cantre supportant les ensouples, la bêche à colle, le séchoir, la table de séparation des fils, et la tête d'ensouple.

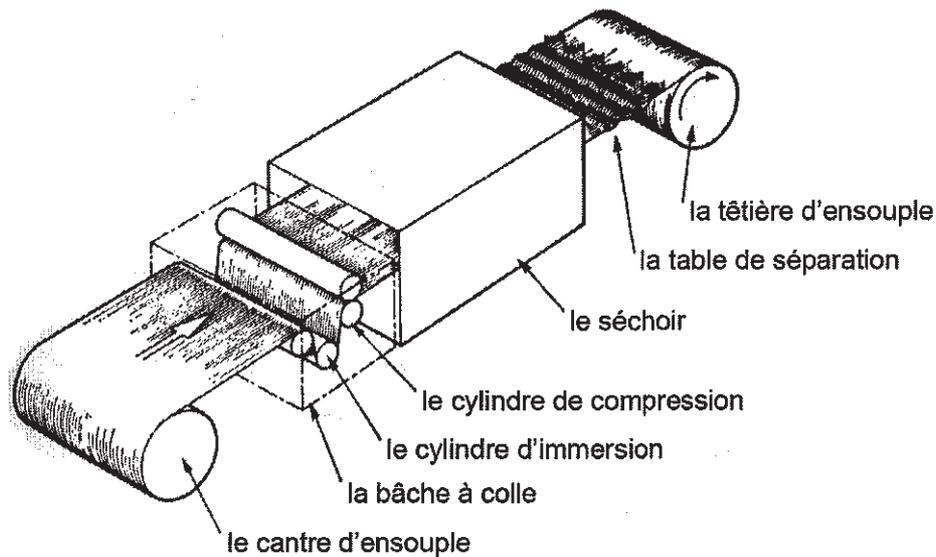


Figure 1-19 : Schéma du processus d'encollage [LOR.82]

1.4.6. Le rentrage et le nouage :

Le rentrage s'effectue après le montage d'une ensouple sur la machine à tisser ou à l'extérieur du métier à tisser au moyen de dispositifs spéciaux. Son but est de rentrer les fils de chaîne un par un dans les lamelles de casse chaîne, puis de les enfilet dans les lisses des lames du dispositif de formation de foule et par la suite dans les dents du peigne.

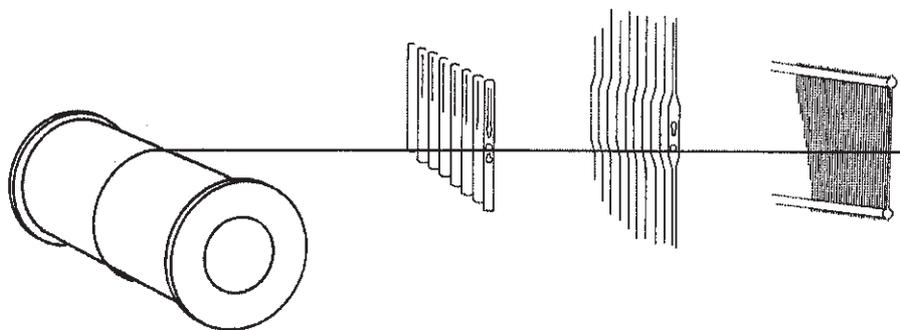


Figure 1-20 : Schéma du processus de rentrage [ADA.01]

Le rentrage se fait soit de façon manuelle (généralement à deux personnes), soit par des machines de rentrage automatiques. Il s'agit d'une opération longue et coûteuse [BEN.06].

Lorsque l'on prévoit d'alimenter la machine à tisser par une chaîne identique à celle qui vient de se terminer, les fils de la nouvelle ensouple sont noués aux fils anciens correspondants. L'opération de nouage est beaucoup plus rapide que le rentrage. En effet, il n'est plus nécessaire de rentrer les fils dans les lamelles, les lisses et le peigne.

1.5. Les parties de la machine à tisser :

1.5.1. Dérouleur de chaîne :

Il a pour rôle d'alimenter la machine à tisser par une nappe de fils de chaîne sous une tension définie en déroulant la nappe stockée sur l'ensouple selon l'appel du tissu. Il est constitué des parties suivantes :

- Le porte-fils
- Le dispositif de régulation de la tension
- Et on peut ajouter le casse chaîne

1.5.1.1. Le porte-fils :

C'est un organe cylindrique permet de dévier la nappe de chaîne pour :

- gagner en longueur de nappe sans augmenter la profondeur du métier,
- maintenir la nappe dans un plan constant (plan du tissage),
- faciliter l'insertion de la trame,
- contribuer à l'obtention de l'aspect et du grain du tissu,
- éventuellement, commander le dérouleur de chaîne.

Il y a trois différents types de porte-fils [DRE.00] :

Porte-fils fixe : il est absolument immobile (sauf le mouvement du régulateur), avec une forme généralement cylindrique de gros diamètre. Il est employé dans les cas où il y a une nécessité de freinage maximal de la nappe par la grande surface de contact. C'est le cas des tissus lourds. Il ne permet pas de récupérer l'allongement sur l'ensouple.

Porte-fils tournant : il tourne librement autour de son axe (sauf le mouvement du régulateur), sa forme est toujours cylindrique. Il est utilisé pour le tissage de chaînes délicates car il permet de récupérer l'allongement de la chaîne jusqu'à l'ensouple. Il peut être transformé en porte-fils fixe en bloquant son mouvement.

Porte-fils oscillant : son axe est soumis à une oscillation provoquée qui modifie la longueur libre de la nappe. Selon son réglage, il peut être transformé en porte-fils fixe ou tournant. Ce type de porte-fils n'est pratiquement plus employé.

Le réglage de la position de porte-fils :

- En hauteur : permet de créer une différence de tension entre les deux nappes ce qui a pour effet de modifier l'aspect du tissu et de modifier le taux de casses.

- En profondeur : permet de récupérer l'allongement de la chaîne dû à l'ouverture de la foule et à la frappe du peigne sur une longueur libre de nappe plus ou moins grande, donc modifie la tension et les variations de tension (table longue : ménage la chaîne, table courte : facilité l'insertion de la trame).

1.5.1.2. Dispositif de régulation de la tension :

Il a pour rôle de :

- délivrer la chaîne sous une tension suffisante et réglable,
- maintenir cette tension pendant toute la durée du tissage de l'ensouple,
- reprendre la chaîne donnée en excédent.

Il y a trois principaux types de régulateur de tension :

Le frein d'ensouple (le régulateur négatif) :

Le frein d'ensouple est le régulateur de tension le plus simple. Une courroie entourée autour de l'axe de l'ensouple et maintenue par un levier, cette courroie permet de freiner l'ensouple, ce freinage s'oppose à l'avance de la chaîne et il la délivre sous une tension. Le réglage de la tension s'effectue en changeant la force appliquée sur le levier ou en changeant la matière de la corde (changer le coefficient du frottement).

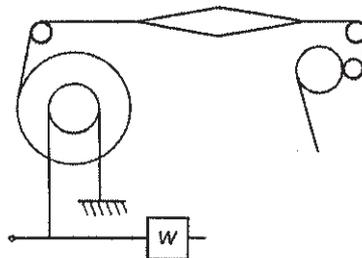


Figure 1-21 : Schéma du régulateur négatif [MAR.76]

L'inconvénient majeur de ce système c'est que la tension de la nappe augmente en diminuant le diamètre de la nappe dans l'ensouple au cours de tissage.

Le frein d'ensouple est seulement utilisé dans un rare cas pour fabriquer de tissu lourd ou pour le tissage à plusieurs ensouples.

Le régulateur semi-positif :

Ce régulateur utilise un capteur de diamètre de la nappe dans l'ensouple qui diminue au cours de tissage (Figure 1-22).

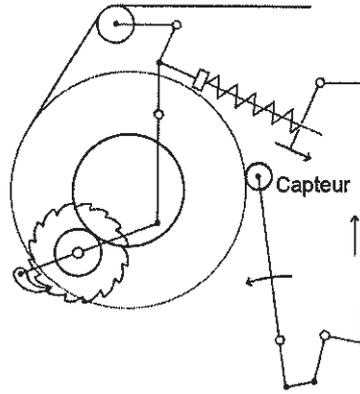


Figure 1-22 : Schéma du régulateur semi-positif

Ce capteur permet de compenser le changement du diamètre en augmentant la vitesse de rotation de l'ensouple pour conserver une vitesse constante de la nappe. Le porte-fils est utilisé pour détecter la tension de la nappe. Cette tension est transmise au régulateur de tension par le biais d'un système de levier. A l'aide d'un mécanisme à cliquet, une roue et une vis sans fin le mouvement rectiligne du levier fait tourner l'ensouple. La rotation de l'ensouple permet de délivrer la nappe selon l'appel du tissu et de maintenir la tension de la nappe constante. La tension de la nappe est ajustée par un ressort. L'oscillation du porte-fils permet de compenser la variation de tension due à l'ouverture de la foule.

Le régulateur de tension semi positif est courant pour le tissage de fibres synthétiques et tous les fils délicats.

Le régulateur continu (positif) :

Ici également le porte-fils joue d'un rôle de capteur de tension. Cette tension est transmise au régulateur soit par système mécanique soit par un détecteur électrique (Figure 1-23).

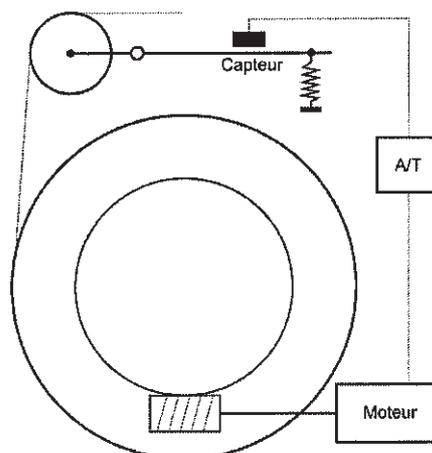


Figure 1-23 : Schéma du régulateur positif

La rotation de l'ensouple est assurée soit par l'arbre du moteur de la machine à tisser à l'aide d'un embrayage soit par un moteur extérieur et d'un réducteur de vitesse. Avec ce type de régulateur, la variation de la tension est totalement compensée par la rotation de l'ensouple.

Ce système est le plus simple à utiliser, aucun réglage n'est nécessaire (sauf l'ajustement de la valeur de la tension). Son inconvénient majeur est qu'il est cher et que sa maintenance est complexe. Il est utilisé sur la plupart des machines à tisser modernes.

1.5.1.3. Le casse chaîne :

C'est le dispositif de sécurité le plus important sur la machine à tisser. Sa fonction principale consiste à arrêter la machine à tisser le plus rapidement possible lorsque l'un des fils de chaîne est cassé. Si le casse chaîne n'est pas détecté immédiatement, le petit défaut deviendra plus grand et le temps de sa réparation deviendra plus long. Ce dispositif permet donc de maintenir une bonne qualité de tissu et de diminuer le temps de la réparation. Ces deux considérations ont un effet direct sur l'efficacité du tissage.

Il y a deux types de casse chaîne, un mécanique et l'autre électrique. Dans les deux cas, il y a des lamelles minces fixées sur chaque fils de chaîne (une lamelle pour un fil). Les lamelles utilisées dans les deux systèmes sont presque similaires. En général, elles ont deux formes :

- Lamelles à extrémité fermée : le fil de chaîne est passé dans le trou de la lamelle (Figure 1-24, A et C).
- Lamelles à extrémité ouverte : la lamelle est posée sur le fil de chaîne (Figure 1-24, B et D). L'avantage de ce type de lamelle qu'elle peut être placée directement sur les fils de chaîne sans avoir besoin d'insérer les fils dans les lamelles, mais elle est moins efficace car les extrémités des lamelles peuvent se croiser.

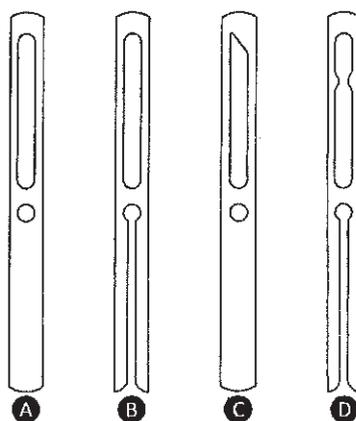


Figure 1-24 : Les types des lamelles [MAR.76]

Le casse chaîne mécanique :

Ce système est constitué de deux barres dentées, les deux barres sont passées dans le grand trou de chaque lamelle. L'une des barres est fixe et l'autre animée d'un mouvement de va-et-vient. Si l'un des fils de chaîne casse, la lamelle tombe entre les dents de deux barres et elle les bloque. L'arrêt du mouvement de la barre mobile permet d'arrêter la machine à tisser.

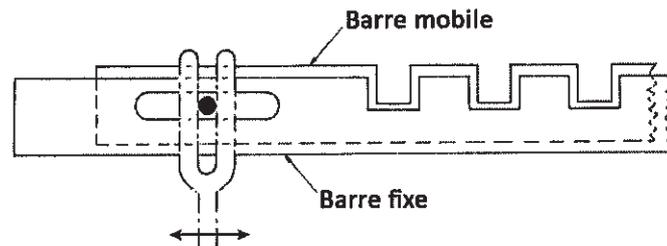


Figure 1-25 : La casse chaîne mécanique [MAR.76]

Les deux barres ont le même nombre de dents mais les dents de la barre mobile sont plus hautes pour pouvoir pousser la lamelle dans les rainures si elle tombe sur une dent.

Le casse chaîne électrique :

Ce système est utilisé sur la plupart de la machine à tisser moderne. Il est constitué de deux barres qui sont utilisées comme des électrodes connectées à un système magnétique. Quand la lamelle tombe, elle ferme le circuit. Le courant électrique passe dans le système magnétique qui permet d'arrêter la machine à tisser.

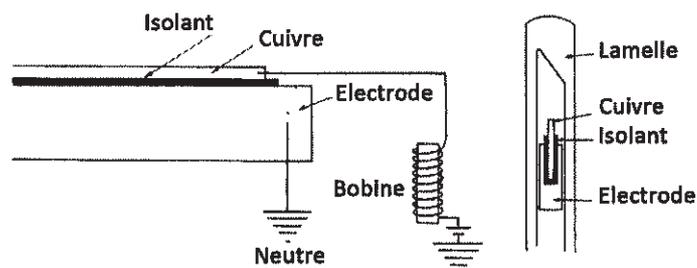


Figure 1-26 : La casse chaîne électrique [MAR.76]

Le casse chaîne électrique est plus rapide que la casse chaîne mécanique. En effet, si la lamelle ne tombe pas directement entre les dents de système mécanique, il faut attendre plusieurs cycles avant qu'elle soit poussée par la barre mobile.

1.5.2. Le dispositif de formation de la foule :

L'ensemble des lisses est réparti sur plusieurs rangées. Il est bien évident qu'il est préférable de placer les lisses dans une seule rangée (dans le même plan) pour que l'ensemble des fils de chaîne ait le même allongement lors de l'ouverture de la foule. Cette condition est impossible à réaliser sur une machine à tisser car il faut séparer les lisses et donner l'indépendance à leur mouvement.

Il y a trois types de réglage de la forme de foule [DRE.00] :

Foule franche : Dans la foule avant, l'ensemble des fils est réparti dans deux plans et seulement dans deux plans (Figure 1-27, A). Toutes les lisses sont réglées pour donner un allongement minimal aux fils. L'angle de foule est choisi en fonction de la hauteur de la rangée arrière. C'est le réglage de foule le plus courant, il facilite l'insertion de la trame. Cependant, il y a des fortes différences d'allongement entre les fils de la première rangée et les fils de la dernière rangée.

Foule droite : En foule ouverte, toutes les lisses sont à la même hauteur de la foule (Figure 1-27, B). Ce type de la foule est facile à régler et il donne peu de différence d'allongement entre deux rangées voisines. Ce pendant, toutes les lisses provoquent un allongement exagéré à l'exception de la dernière rangée. En plus, la géométrie de la foule avant forme un mauvais guidage du vecteur.

Foule elliptique : En foule ouverte, les œillets des lisses sont sur une même ellipse dont les foyers correspondent aux points de fermeture de la foule (Figure 1-27, C). L'avantage de ce réglage est que tous les fils ont le même allongement. Cependant, ce type de foule est difficile à régler surtout quand le nombre de rangées de lisses est élevé. Ici également la géométrie de la foule avant forme un mauvais guidage du vecteur.

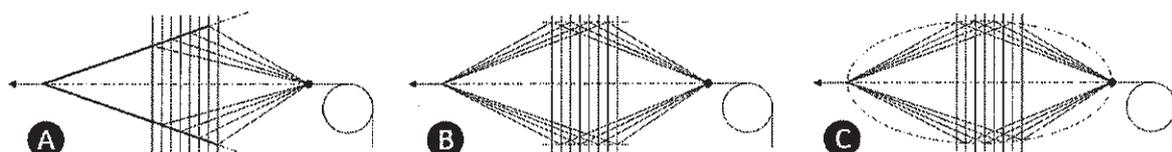


Figure 1-27 : Les différentes géométries de la foule

L'ensemble de lisses est commandé par le système de formation de la foule. Ce dispositif doit permettre d'ouvrir suffisamment la foule pendant le passage du vecteur en respectant les contraintes suivantes :

- l'accélération du mouvement des lisses aussi faible que possible,

- le temps de repos en foule ouverte aussi long que possible,
- moment d'ouverture réglable,
- hauteur de la foule réglable pour chaque rangés de lisses
- la position en hauteur réglable pour chaque rangées de lisses (la forme de la foule).

1.5.2.1. Le dispositif à cames (mécanique d'armures fondamentales) :

L'ensemble des lisses est séparé dans des rangées, les lisses de chaque rangée sont montées sur un cadre. Les cadres sont commandés par le dispositif à cames. Le mouvement des cadres permet de séparer les fils de chaîne et former la foule.

Ce dispositif est constitué de plusieurs cames montées sur un arbre. Cet arbre est relié à l'arbre du moteur de la machine à tisser par un réducteur de vitesse. La rotation de chaque came grâce à son profil permet de monter et descendre un cadre (Figure 1-29).

Ce type de dispositif de formation de foule est précis, rapide, puissant et peu onéreux, mais il a deux inconvénients majeurs [ADA.01] :

- c'est un système qui est difficile à régler. Parce qu'il faut remplacer les cames pour changer l'armure à tisser. Le choix du profil de la came dépend de l'évolution du fil selon l'armure désirée.
- il est limité par le nombre de cadres qu'il peut commander (14 cadres) et le nombre de duites au rapport de l'armure (8 duites au rapport). C'est pourquoi il est réservé au tissage des armures de base.

Le nombre de duites au rapport est limité par le nombre de sommets de la came. Le profil de la came est conçu pour donner un mouvement doux sans excès d'accélération et de force. De ce fait si le nombre de sommets augmente, le profil de la came doit être plus grand, ce qui va augmenter la taille de la came et la puissance nécessaire pour sa rotation.

Le nombre de cadres commandés est relié au nombre des cames. Si le nombre de cames augmente l'espace disponible pour le montage de chacune va devenir plus petit.

Il y a deux types de mécanique d'armure : négatif ou positif.

Dispositif à cames négatifs :

Les cadres sont montés ou levés par le dispositif à cames mais un système d'action extérieur, il s'agit dans la plupart de cas des ressorts pour chaque cadre, permet de descendre les cadres. La figure 1-28 montre le principe d'un dispositif à cames négatif. Ce dispositif est de moins en moins utilisé sur les nouvelles machines à tisser.

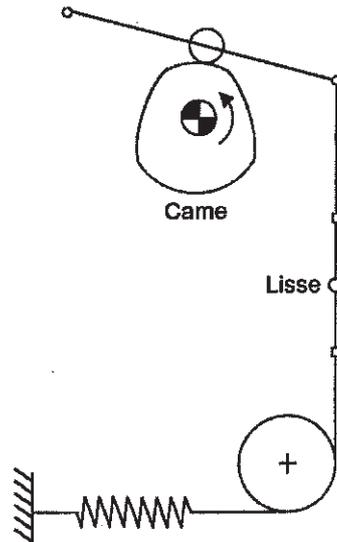


Figure 1-28 : Dispositif de formation la foule à cames négatifs [ADA.01]

Dispositif à cames positif :

Ce dispositif est capable de monter et descendre les cadres sans l'utilisation des actionneurs extérieurs. Il y a deux différents types, le premier est montré dans la figure 1-29. Dans ce cas, le roulement de suivi passe dans la rainure gravée sur la came. Le roulement est monté sur le levier oscillant et il permet de l'actionner. Le levier actionne à son tour un seul cadre par un moyen de système de leviers. L'hauteur de la foule est réglée en changeant la position ❶ sur le levier oscillant.

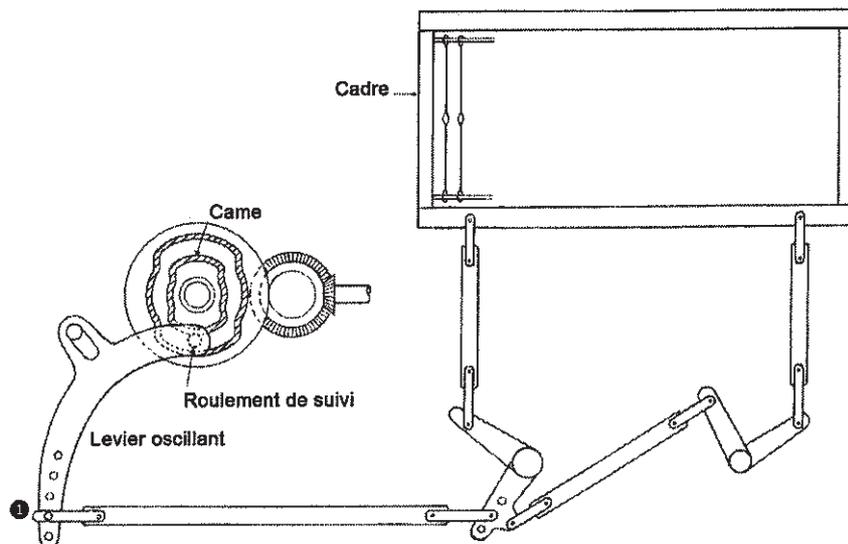


Figure 1-29 : Dispositif de formation la foule à cames positifs [ADA.01]

Le deuxième principe utilise une paire de cames fixées ensemble et deux galets de suivi pour actionner le levier oscillant. Les galets sont fixés sur le levier oscillant et chacun d'entre eux est toujours en contact avec l'une des deux cames. Ici également, la hauteur de la foule est réglée en changeant la position ❶ sur le levier oscillant.

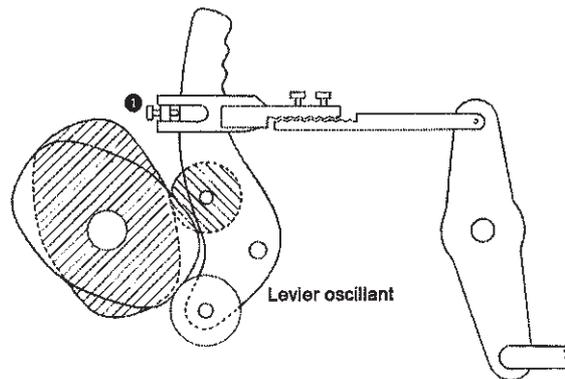


Figure 1-30 : Dispositif de formation la foule à double cames [ADA.01]

La connexion rigide entre le dispositif à cames positif et les cadres donne un mouvement doux et positif et permet d'augmenter la vitesse de la machine à tisser. Un autre avantage est que le mécanisme se trouve à coté de la machine à tisser et en dessous de la nappe des fils de chaîne et ce qui donne un accès facile aux différentes parties du dispositif et élimine le risque d'avoir des tâches d'huile sur le tissu.

1.5.2.2. La ratière :

Les lisses sont séparées dans plusieurs rangées, les lisses de chaque rangées sont montés dans un cadre. Les cadres sont commandés par la ratière.

Généralement, la ratière est constituée de deux fonctions principales :

- La partie puissance : permet d'actionner les cadres.
- La partie sélection : permet de connecter ou déconnecter les cadres de la partie puissance.

La ratière est plus complexe et plus chère que le dispositif à cames. Elle est également placée à l'extérieur de la machine à tisser, c'est pourquoi elle est très accessible. Ce dispositif est plus ou moins rapide selon son type. Il permet de commander jusqu'à 28 cadres avec un nombre illimité de duites au rapport. Ce système est facile à régler et le changement d'armure est très rapide.

Il y a deux types de ratière : ratière positive et ratière négative.

La ratière négative :

De même que le dispositif à cames négatif, les cadres sont montés ou levés par la ratière et reviennent à leur position initiale à l'aide des ressorts.

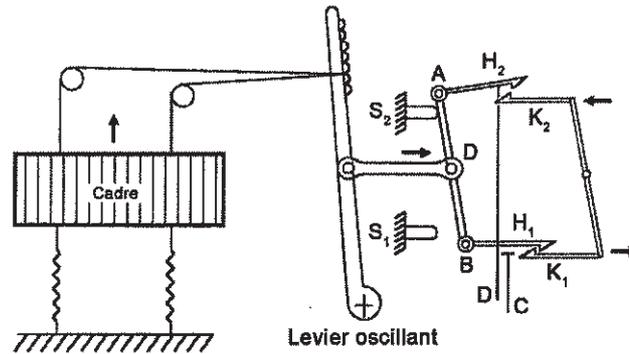


Figure 1-31 : Principe de la ratière négative [ADA.01]

La figure 1-31 montre le principe de fonctionnement pour la commande d'un seul cadre. Les couteaux K_1 , K_2 sont reliés à l'arbre du moteur de la machine à tisser par un réducteur de vitesse d'un rapport $\frac{1}{2}$ et ils sont animés d'un mouvement de va-et-vient. Chaque cadre peut être relié aux deux couteaux à l'aide de deux crochets H_1 , H_2 . Les deux leviers C, D commandent les crochets H_1 , H_2 et ils sont actionnés par le système de sélection (anciennement on utilisait un système de carte perforée avec une tête de lecture. Récemment, on utilise des électro aimants commandés par un système électronique). Les deux organes S_1 , S_2 jouent un rôle d'un palier et ils limitent le mouvement des extrémités du levier AB.

Si le levier C est en position bas, le crochet H_1 descend et il s'engage avec le couteau K_1 . Le mouvement du couteau vers la droite entraîne le crochet K_1 et s'éloigne l'extrémité B du levier AB de son palier S_1 , ce qui oblige le levier AB à pivoter autour le point de contact entre son autre extrémité A et le palier S_2 . Le mouvement du levier AB est transmit au levier oscillant à l'aide du lien D. Le levier oscillant permet d'amplifier le mouvement et d'actionner un seul cadre. Le ressort de retour qui agit sur le cadre permet également de maintenir au moins l'une des deux extrémités du levier AB en contact avec les paliers S_1 , S_2 .

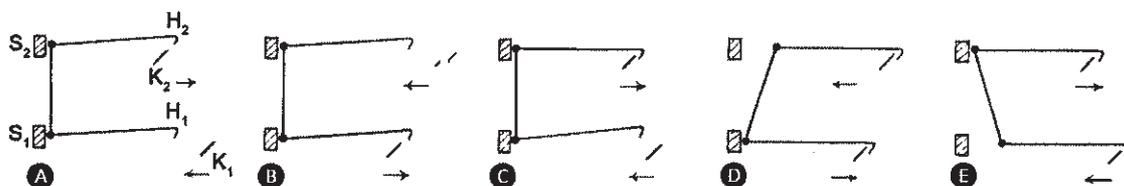


Figure 1-32 : Les différentes positions des couteaux [LOR.82]

Les différents cycles de l'opération sont illustrés par des lignes simplifiées dans la figure 1-32. Dans chaque diagramme, les couteaux sont montrés en position extrême de leur mouvement. La sélection ou la désélection d'un crochet se fait seulement quand le crochet est en contact avec le palier.

Diagramme A : aucun de deux crochets n'a pas été sélectionné pendant le cycle précédant de la machine à tisser. Le cadre est en position inférieure et il va rester en cette position pour le prochain cycle.

Diagramme B : présente la situation après un cycle. Aucun de deux crochets n'a été également sélectionné, le cadre reste en position inférieure et il va rester à cette position jusqu'à la sélection d'un de deux crochets.

Diagramme C : présente la situation après un cycle. Le crochet H_2 est sélectionné. Le cadre est toujours en position inférieure mais le mouvement du couteau K_2 vers la droite, dans le cycle suivant, va entraîner le crochet H_2 comme le diagramme D.

Diagramme D : le mouvement du couteau K_2 entraîne le crochet K_2 et permet de lever le cadre. Le crochet K_1 est sélectionné, le mouvement du couteau K_1 vers la droite, dans le cycle suivant, va entraîner le crochet H_1 comme le diagramme E.

Diagramme E : le mouvement du couteau K_1 entraîne le crochet K_1 vers la droite. Le mouvement du couteau K_2 vers la gauche retourne le crochet K_2 vers son palier. Le levier tourne autour son milieu. Le centre du levier ne bouge pas et le cadre reste en position supérieure.

La ratière positive :

L'utilisation d'une ratière positive élimine le besoin des ressorts de retour. Cependant, sans les ressorts de retour, il n'y a aucune force pour descendre le cadre, pour maintenir l'un de deux crochets en contact avec les paliers et pour retourner le crochet qui a été entraîné par le couteau à son palier. C'est pourquoi dans toutes les ratières positives il y a deux barres B_1 , B_2 reliés rigidement aux deux couteaux K_1 , K_2 et ils sont animés également du même mouvement de va-et-vient des couteaux (Figure 1-33, A). Quand le couteau recule après avoir entraîné un crochet, la barre pousse le crochet et le met en contact avec son palier. Le crochet désélectionné K_1 s'engage avec le couteau fixe L_1 ce qui permet de bloquer le mouvement du crochet jusqu'à qu'il soit sélectionné de nouveau. La ratière positive et la ratière négative ont été remplacées par la ratière rotative car elle est plus rapide.

La ratière rotative :

Ces ratières rotatives (Figure 1-33, B), supprimant le mouvement alternatif des couteaux, sont fondées sur le principe d'une came appelé excentrique qui est ou non entraîné en rotation par un entraîneur central. La mise en rotation de l'excentrique par l'entraîneur est réalisée par un couplage mécanique piloté par un dispositif de lisage électronique. Ces ratières rotatives sont des ratières positives permettent d'atteindre des vitesses de 1000 tr/min et jusqu'à des formats de 28 lames.

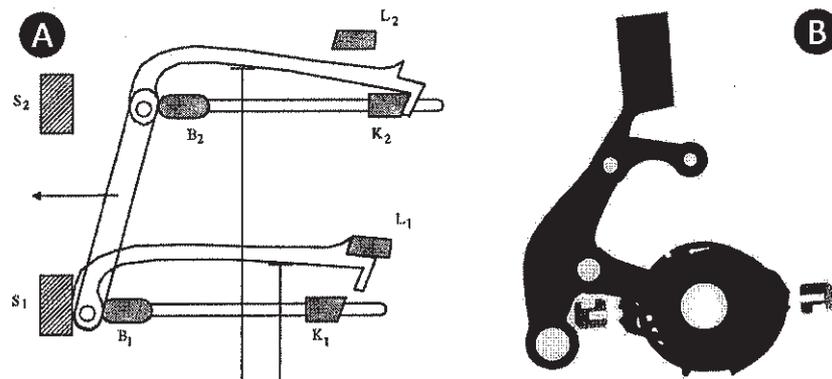


Figure 1-33 : A – Principe de la ratière positive, B – Principe de la ratière rotative [ADA.01]

1.5.2.3. La mécanique jacquard :

Chaque lisse est reliée directement au dispositif de formation de foule par le fil d'arcade. La mécanique jacquard permet de commander individuellement jusqu'à 2 x 12000 lisses à partir d'une mémoire électronique avec un nombre illimité de duites au rapport. En revanche, il s'agit d'un dispositif complexe, cher et relativement lent. Il est placé au-dessus de la machine à tisser. La mécanique jacquard est un dispositif négatif, le retour de chaque lisses à sa position initiale est assuré par un ressort.

De même que la mécanique de la ratière, la mécanique jacquard est constituée de deux fonctions principales :

- La partie puissance : permet d'actionner les lisses.
- La partie sélection : permet de connecter ou déconnecter les lisses de la partie puissance.

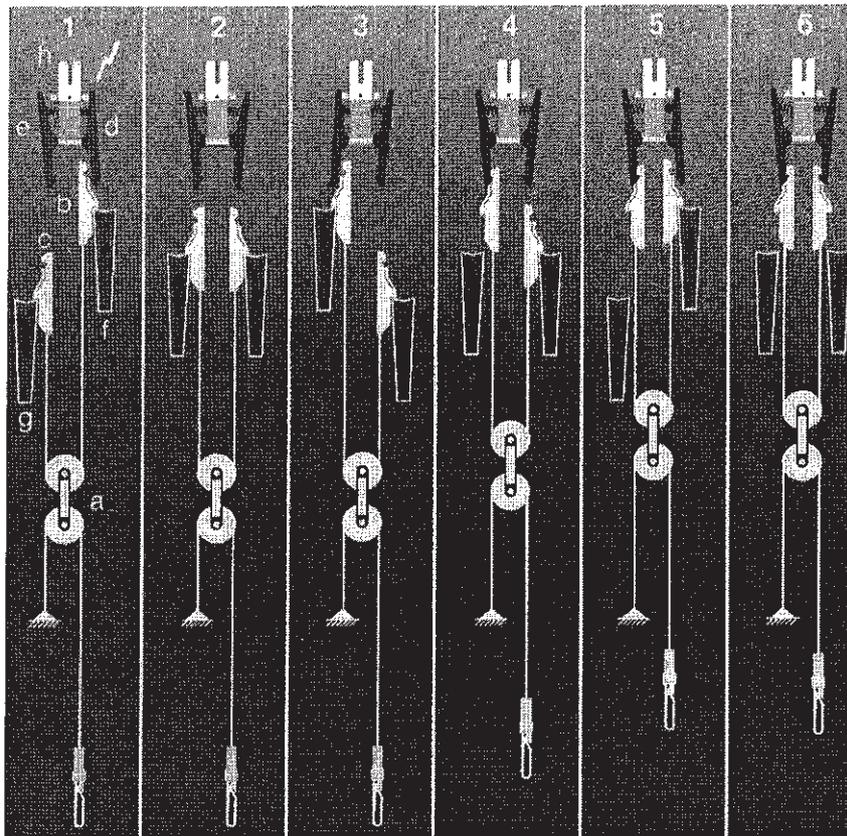


Figure 1-34 : Principe de la mécanique Jacquard STAUBLI [ADA.01]

La figure 1-34 présente le principe de la commande d'une seule lisse. Ici également il y a deux couteaux F, G reliés à l'arbre de la machine à tisser et ils sont animés d'un mouvement de va-et-vient. Le palonnier A est relié à une lisse par une corde. Le déplacement de lisse est deux fois plus grand que le déplacement du palonnier.

Diagramme 1 : La lisse en position basse: le crochet mobile B est en position supérieure et il pousse le crochet fixe D contre un électro aimant. Cet aimant est activé selon l'armure désirée. L'activation de cet aimant empêche le crochet fixe D de s'engager avec le crochet mobile B.

Diagramme 2 : La lisse en position basse: les crochets mobiles (b) et (c) suivent la montée et la descente des couteaux. Le palonnier compense le mouvement des crochets mobiles B et C et il reste dans sa position.

Diagramme 3 : La lisse en position basse: grâce au mouvement du couteau G vers le haut, le crochet mobile C monte en position supérieure et il pousse le crochet fixe E contre un électro aimant. Cet aimant est activé selon l'armure désirée. Le non activation de cet aimant laisse le crochet fixe E s'engager dans le crochet mobile C.

Diagramme 4 : Le mouvement de la lisse : le crochet mobile C est retenu par le crochet fixe E. le crochet mobile B suit le mouvement du couteau F vers le haut. Le palonnier monte et il tire la lisse.

Diagramme 5 : La lisse en position haute: le crochet mobile C reste engagé dans le crochet fixe E. Le crochet mobile B pousse le crochet fixe D contre l'électro aimant grâce au mouvement du couteau F vers le haut. La non activation de cet aimant laisse le crochet fixe D s'engager avec le crochet mobile D. le palonnier est en position supérieure.

Diagramme 6 : La lisse en position haute: Les deux crochets mobiles B, C sont engagés dans les deux crochets fixés D, E. les couteaux peuvent monter et descendre mais le palonnier reste à sa place.

1.5.3. Le système d'insertion de trame :

Ce dispositif permet de déposer le fil de trame entre les deux nappes des fils de chaîne lors de l'ouverture de la foule.

Il doit répondre aux contraintes suivantes :

- Respecter la place disponible : cette place dépend de la hauteur de la foule et de sa profondeur.
- Assurer la trajectoire de la duite : déposer la trame sur toute la largeur du tissu, d'une lisière à l'autre.
- Insérer la trame dans un minimum de temps : le temps disponible dépend de la loi de mouvement du système d'insertion, du moment d'insertion par rapport à ceux du peigne et des lames, de la loi de mouvement du peigne, et de la largeur du tissu.
- Dévider de la trame : la facilité de dévidage à la défilée d'une bobine dépend de sa forme, sa taille et de la matière du fil (pilosité).
- Détecter la casse du fil de trame : arrêter la machine à tisser le plus rapidement possible quand le fil de trame est cassé.
- Insérer la trame sous une tension constante mais sans surtension et sans à-coups de tension.

Les machines à tisser sont classées selon le type de dispositif d'insertion. Il y a trois grands principes d'insertion de la trame :

- Trame déposée par un vecteur porteur d'une réserve de trame : métier conventionnel à navette.

- Trame tirée duite à duite par le vecteur à travers la foule à partir d'une réserve de trame (bobine) placée à l'extérieur de la machine à tisser : machines à projectiles, machines à lances, machines à jet d'eau et machines à jet d'air.
- Trame insérer par inertie : la trame, emmagasinée sous forme de bobine à l'extérieur de la machine, reçoit une impulsion extérieure et se place dans la foule par sa propre inertie. Cette méthode d'insertion n'existe qu'en tant que prototype.

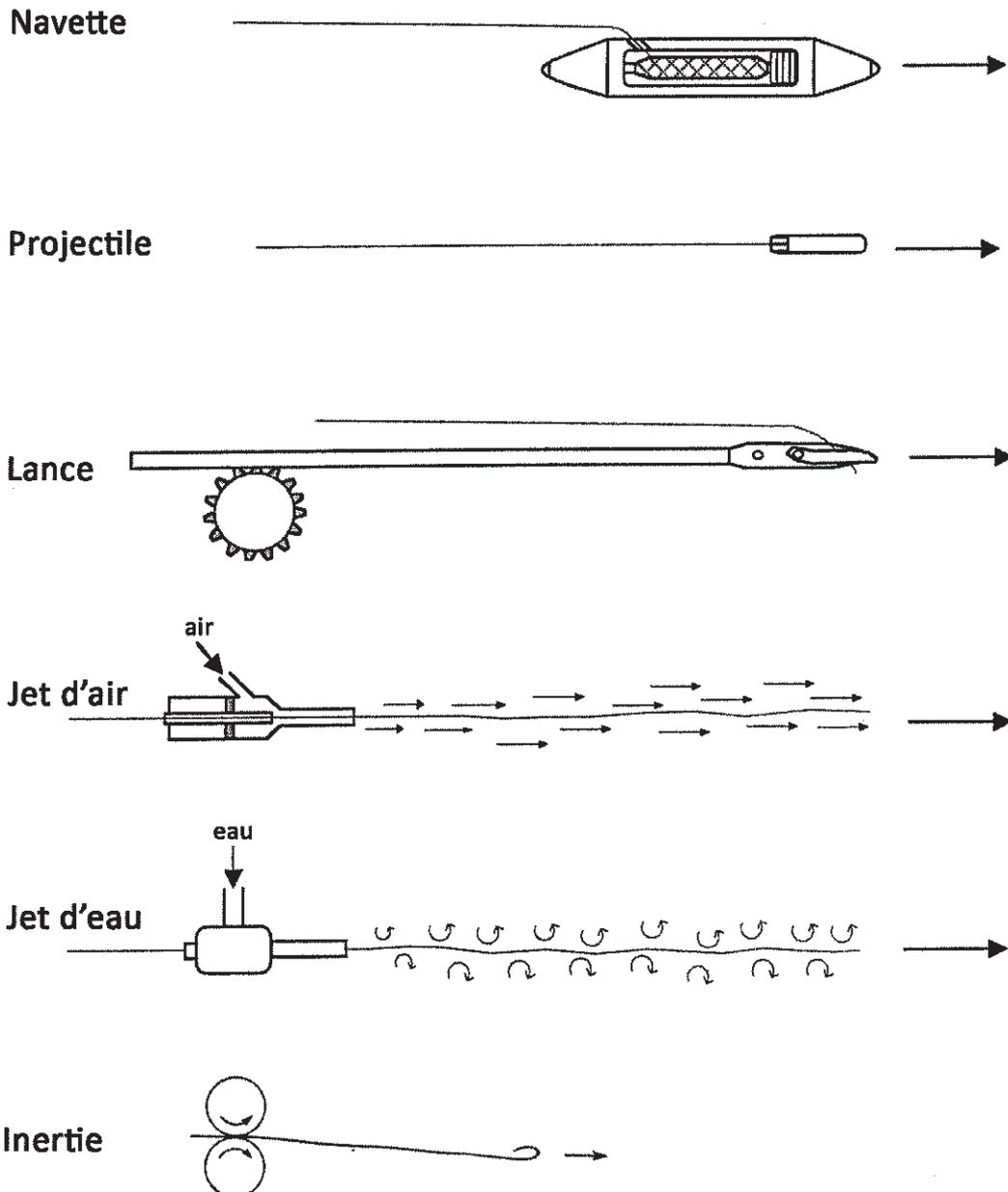


Figure 1-35 : Les différents principes d'insertion [ADA.01] et [LOR.82]

1.5.3.1. Métier conventionnel à navette :

C'est le système d'insertion le plus ancien, il a été utilisé sur les métiers à tisser manuels et il est encore utilisé sur les métiers à tisser conventionnels (à l'heure actuelle, plus de 2,5 million de métier à navette existe dans le monde). Le fil de trame est emmagasiné dans une petite bobine la canette. La canette est montée sur la navette (Figure 1-36) qui est animée d'un mouvement continu de va-et-vient. Lors de parcours de la navette sur toute la largeur du métier en allant ou en revenant, la canette est dévidée et le fil de trame est déposé dans la foule.

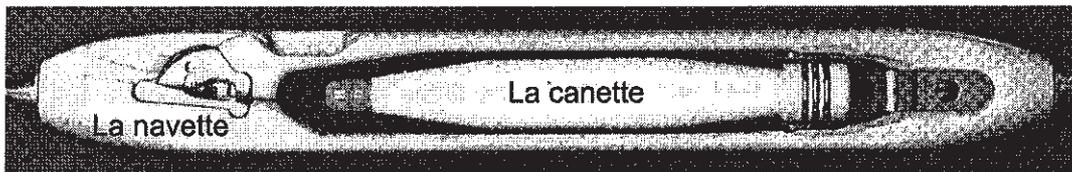


Figure 1-36 : La canette montée sur la navette [ADA.01]

De chaque côté du métier, il y a un dispositif qui permet de chasser la navette et un autre pour la freiner.

Le mouvement de la navette est composé de trois phases :

- Lancer : il a pour rôle de passer de la vitesse nulle à la vitesse maximale le plus rapidement possible et avec une accélération faible (<500 à 600 m.s^{-2})
- Traversée : elle a pour rôle de déposer la trame dans la foule dans un minimum de temps et selon une trajectoire sûre.
- Freinage : il sert à ralentir puis à immobiliser la navette le plus rapidement possible.

Le fil de trame n'étant pas coupé à chaque cycle, ce système est le seul qui permet de fabriquer de tissu avec des vraies lisières (possibilité de tisser un tissu tubulaire ou double largeur).

Cependant ce système possède plusieurs inconvénients car il nécessite [LOR.82] :

- De changer régulièrement la canette (petite bobine),
- une grande hauteur de la foule (grande taille de la navette),
- une puissance de chasse importante,
- de limiter la vitesse du système.

1.5.3.2. Le projectile :

Le fil de trame est emmagasiné dans une bobine à l'extérieur de la machine à tisser. Un prédélivreur automatique permet de dévider la bobine et d'alimenter le système d'insertion par le fil de trame à une vitesse élevée.

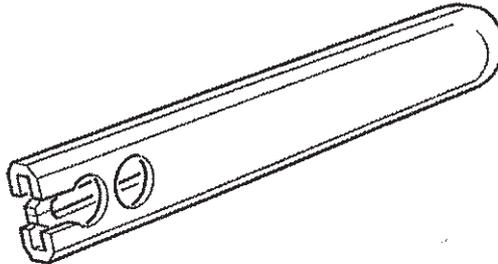


Figure 1-37 : Le projectile [ADA.01]

Dans ce système la navette est remplacée par un projectile métallique de faibles dimensions donc de faible masse, comportant à sa partie arrière une pince dans laquelle est tenue l'extrémité de la duite (Figure 1-37).

Etant donné que la masse à lancer est faible (environ 40 g), le projectile est lancé avec une forte accélération (environ 4000 m.s^{-2}) ce qui permet de tisser à grande vitesse sur de grands empeignages (jusqu'à 15 m) tout en consommant moins d'énergie que sur le métier à navette.

De même que le métier à navette, le mouvement du projectile est constitué de trois phases principales : lancer, traversée, freinage. La figure 1-38 montre le cycle d'insertion de la trame :

- La trame provenant de la bobine passe par un frein ❶ et un tendeur. Un donneur permet de tenir l'extrémité du fil de trame et la transférer à la pince du projectile.
- La pince du donneur s'ouvre, le projectile va être chassé. Le frein ❶ va s'ouvrir et le bras mobile du tendeur va descendre pour donner « du mou » à la trame.
- Le projectile est chassé par une barre de torsion de la gauche vers la droite et freiné par le frein ❷
- Le frein ❶ se ferme et le tendeur tire la trame pour ramener le projectile vers le tissu et compenser le parcours nécessaire pour le freinage du projectile.
- Le donneur s'approche du ciseau qui s'apprête à couper la trame et il pince la trame.

- f. La trame est coupée par le ciseau. La pince du projectile s'ouvre et libère la duite. Le donneur revient à sa place initiale. Le frein ❶ s'ouvre. Le tendeur emmagasine une réserve de trame.
- g. Le projectile est ramené par le convoyeur vers la droite. Le frein se ferme et on retour à la position du départ.

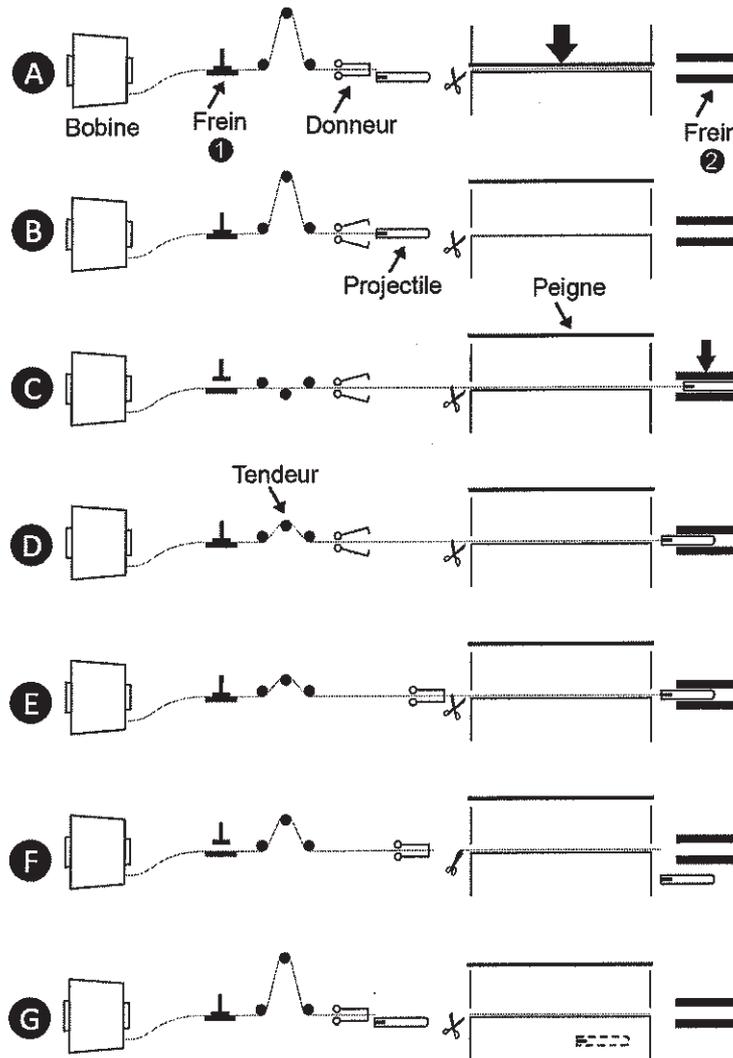


Figure 1-38 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à projectile de type Sulzer

1.5.3.3. La lance :

Le fil de trame est emmagasiné dans une bobine à l'extérieur de la machine à tisser et il est appelé par le prédélivreur. Une ou deux lances équipées d'une pince permettent de tirer le fil de trame à travers la foule.

En général, il y a deux principes d'insertion : Gabler et Dewas

La figure 1-39 montre la succession des opérations du principe d'insertion par boucle Gabler :

- Les lances sont à l'extérieur de la foule, le fil de trame est tenu dans la pince fixe après être passé dans le présentateur en position basse et le frein est ouvert.
- Les deux lances rentrent dans la foule et la lance alimentaire forme une boucle de fil.
- Après le transfert du fil de trame à la lance de sortie, la pince est ouverte et le frein est bloqué. La boucle de fil de trame est dépliée par la lance de sortie.
- Les lances étant sorties, la première duite est déposée et frappée par le peigne contre le tissu. Le frein s'ouvre et le présentateur se met en position haute.
- Les lances rentrent de nouveau dans la foule et la lance alimentaire forme une boucle (l'extrémité du fil est reliée à la duite précédente).
- Juste après le transfert, le frein se bloque, la pince se referme puis la trame est coupée par le ciseau.
- Le présentateur descend en position basse et le frein s'ouvre, le peigne frappe la deuxième duite ; on retourne à la position initiale.

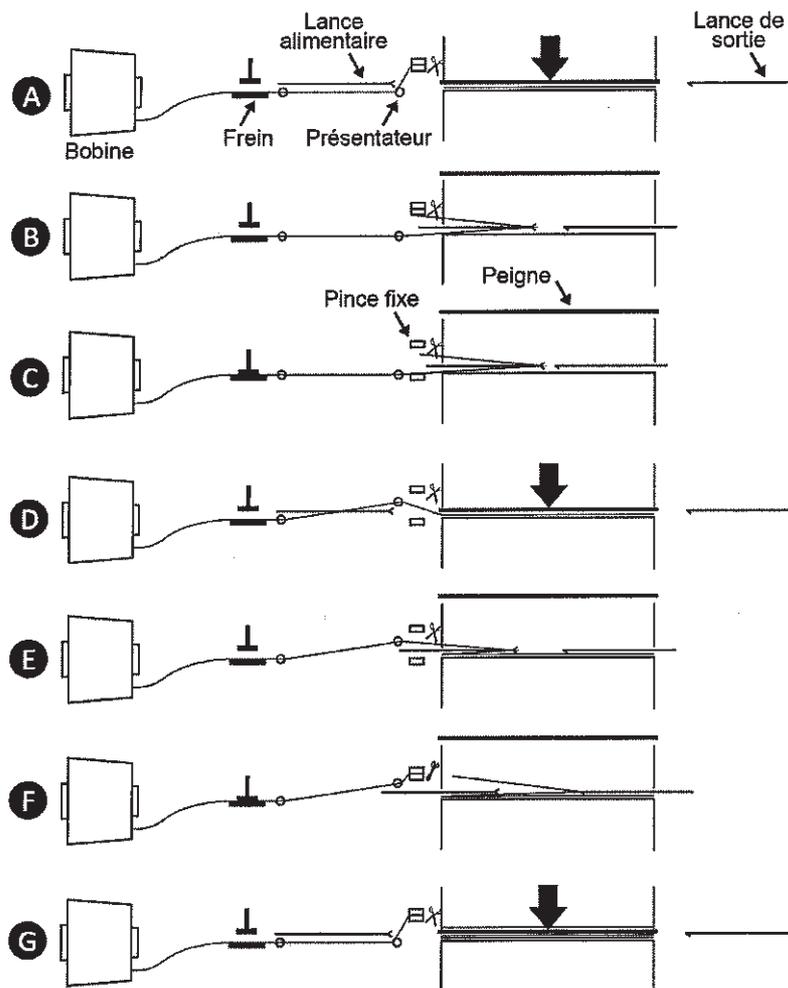


Figure 1-39 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à lance de type Gabler

La figure 1-40 montre la succession des opérations du principe d'insertion par extrémité type Dewas :

- a. Les lances sont à l'extérieur de la foule, le fil de trame est tenu dans la pince fixe après être passé dans le présentateur.
- b. Les deux lances rentrent dans la foule, le fil de trame est engagé dans la pince de la lance alimentaire puis il est lâché par la pince fixe.
- c. La lance alimentaire tire le fil de trame.
- d. Après transfert le fil de trame à la lance de sortie, la lance alimentaire sort à vide et la lance de sortie tire le fil de trame.
- e. A la fin de parcours, le ciseau coupe le fil de trame.
- f. Le fil de trame a été coupé au niveau de la pince fixe ; on est revenu à la position initiale.

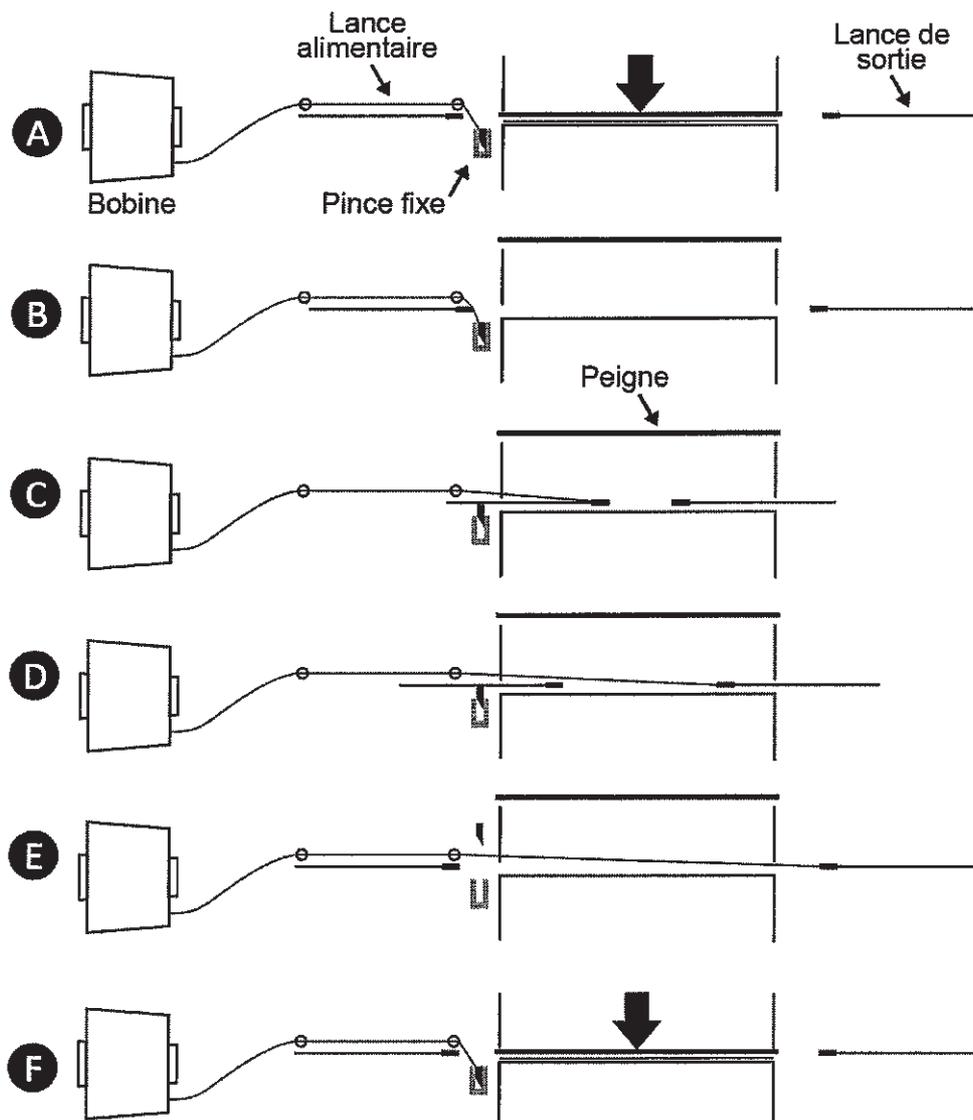


Figure 1-40 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à lance de type Dewas

Le dispositif d'insertion à lance peut être classé selon :

Le nombre de lances :

- Lance unilatérale : une seule lance tire le fil de trame. Il n'y a pas de problème de transfert mais la phase de sortie de la foule constitue un temps mort (perte de production).
- Lance bilatérale : deux lances, une de chaque côté de la machine à tisser, tirent le fil de trame.

Le type des lances :

- Lance rigide : la trajectoire de la lance est assurée mais l'encombrement latéral de la machine à tisser est très important.
- Lance souple : la lance en position repos est enroulée sur un tambour et nécessite un guidage dans la foule.

L'emplacement du dispositif :

- Chasse mobile : le dispositif est monté sur le battant du peigne. Cela permet d'allonger le temps d'insertion.
- Chasse fixe : le dispositif est monté sur le bâti de la machine à tisser. Cela permet d'alléger le battant.

Le dispositif d'insertion à lance permet d'insérer du fil de trame sans tension excessive et d'assurer sa trajectoire, ce qui permet de tisser des fils de trame relativement fragiles.

1.5.3.4. Le jet d'eau :

Le fil de trame est emmagasiné dans une bobine à l'extérieur de la machine à tisser. Le dispositif de mesure permet d'appeler la longueur nécessaire de fil de trame à la duité. Le fil mesuré est mis en réserve dans un tube à dépression ou un prédélivreur, car il doit être à une tension pratiquement nulle au moment son départ (Figure 1-41).

Au moment de la chasse, le jet d'eau émis par la buse latérale et traversant la foule entraîne le fil dans cette dernière.

A la fin d'insertion le fil de trame est coupé à la sortie de la buse latérale par un ciseau.

Le fil de trame doit être constamment enfilé dans la buse latérale. En revanche, pendant la phase de non insertion, le fil de trame risque de ressortir de la buse sous l'effet de la dépression du tube, il est donc indispensable d'utiliser la pince pour bloquer le fil de trame et l'arrêter à la longueur voulue.

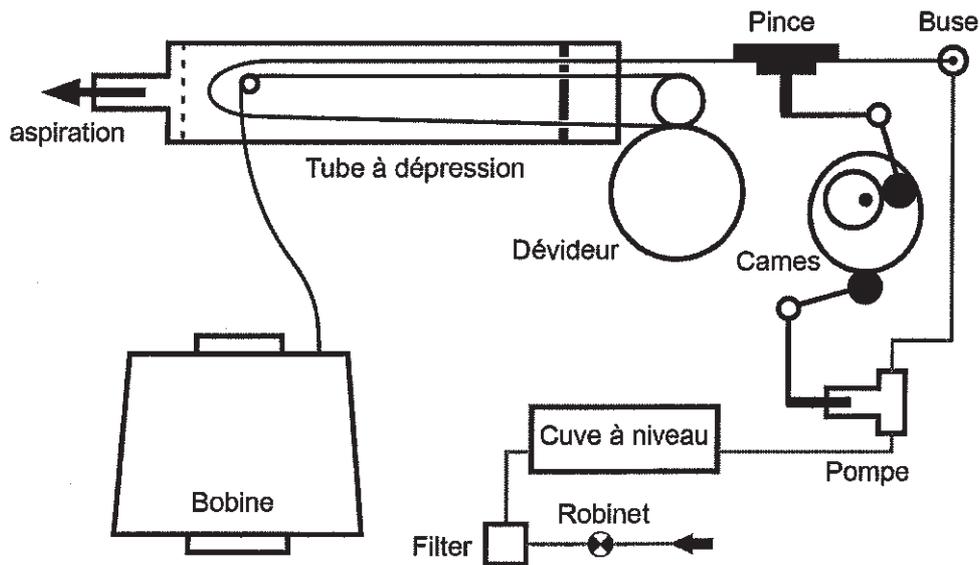


Figure 1-41 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à jet d'eau

La pompe permet d'injecter l'eau dans la buse. Elle est alimentée de l'eau à partir d'un réseau interne de distribution. L'eau passe par un robinet et un filtre et la cuve à niveau constant dont le rôle de régulariser la pression à la rentrée de la pompe.

L'inconvénient majeur des machines à tisser à jet d'eau est de produire des tissus mouillés. En général, cette méthode d'insertion est utilisée pour tisser les matières hydrophobes.

L'autre inconvénient, la nécessité de purifier l'eau de toutes les impuretés mécaniques et chimiques. La moindre fibrille déposée sur la buse modifie la forme du jet et donc sa portée. Les sels et particulièrement les sels de Fe et Mg attaquent les parties métalliques de la machine à tisser.

1.5.3.5. Le jet d'air :

Le fil de trame emmagasiné dans une bobine à l'extérieur de la machine à tisser est appelé par le dispositif de mesure et il est gardé dans le tube à dépression. L'extrémité du fil de trame est constamment enfilée dans la buse latérale (Figure 1-42).

Au moment de la chasse, l'air, introduit dans la buse latérale, entraîne le fil de trame sur une distance suffisante pour le mettre à portée des premières buses relais.

Les groupes de buses relais sont actionnés successivement pour créer un matelas d'air mobile. Le moment et la durée de l'action, ainsi que le débit et la pression de chacun de ces groupes conditionnent la bonne insertion de la duite.

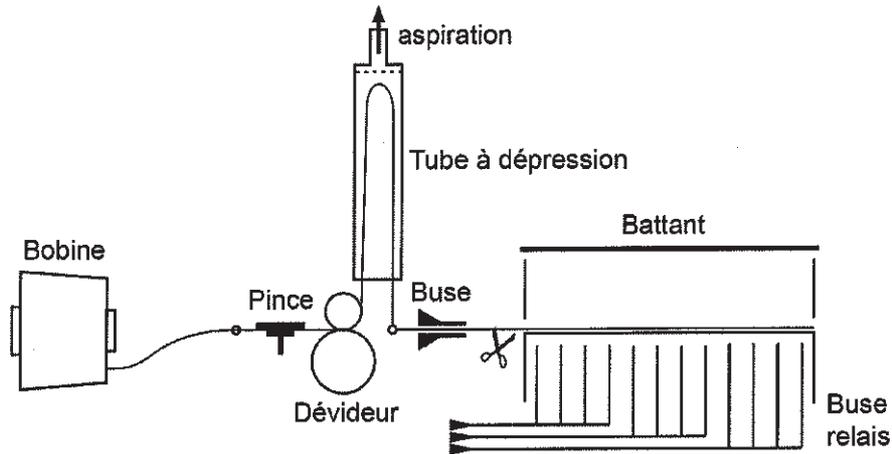


Figure 1-42 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à jet d'air

A la fin d'insertion, le fil de trame est bloqué par la pince et coupé à la sortie de la buse latérale par un ciseau.

Etant donné que le jet d'air émis par les buses se disperse rapidement, il est donc indispensable d'utiliser :

- plusieurs buses relais
- des lamelles formant une sorte de tuyau de guidage dans lequel se déplacent l'air et le fil de trame. Ce tuyau est appelé confuseur ou confineur.

L'air comprimé provenant de la station de compression doit être purifié de toutes sortes d'impuretés telles que poussière ou fibres ; d'eau (liquide ou vapeur) et de huile (liquide ou vapeur).

L'avantage de ce système d'insertion est de simplifier la mécanique d'insertion et de pouvoir augmenter la vitesse de production grâce à la vitesse élevée d'insertion.

Le tableau 1-1 compare la vitesse d'insertion de différents principes d'insertion.

	La laize [cm]	Vitesse d'insertion [duite/min]	Vitesse d'insertion [m/min]
Projectile	300 - 545	300 - 370	1000 - 1400
Lance	160 - 360	270 - 700	900 - 2000
Jet d'eau	125 - 210	700 - 1600	1400 - 2700
Jet d'air	125 - 380	700 - 1200	1200 - 3200

Tableau 1-1 : La performance de différents types des machines à tisser [ADA.01] [LOR.82]

1.5.4. Dispositif de mouvement du peigne :

Le fil de trame est inséré dans une position relativement loin à la façade du tissu final, car les dispositifs d'insertion ne peuvent pas déposer la duite au sommet de l'angle d'ouverture de la foule (faute de place).

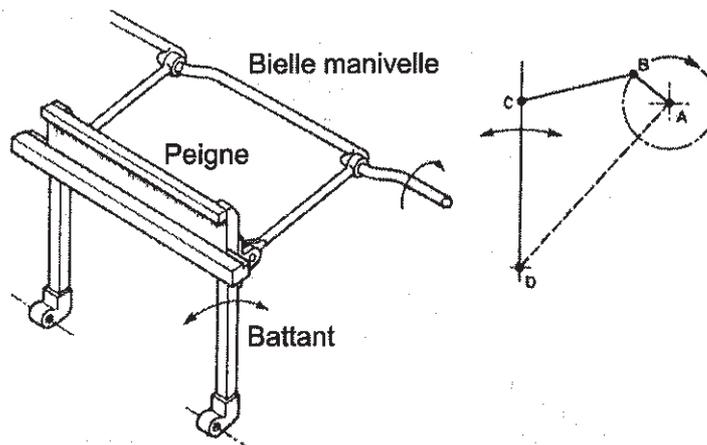


Figure 1-43 : Dispositif de mouvement du peigne [LOR.82]

Le peigne est monté sur le battant. Ce dernier permet :

- d'avancer le peigne pour frapper la duite qui vient d'être déposée contre la façade du tissu final,
- et le retourner à sa position initiale avant l'insertion d'une nouvelle duite.

Le dispositif de mouvement du peigne peut être un système à bielle manivelle (Figure 1-43) ou un système à came.

Le moment de frappe doit être réglable pour pouvoir tisser soit à pas ouvert soit à pas fermé (Figure 1-44).

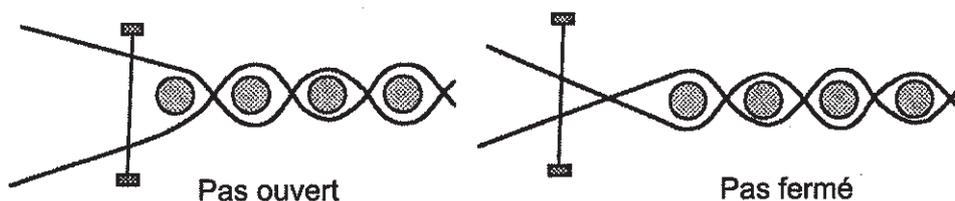


Figure 1-44 : Types de pas [ADA.01]

Le peigne est formé de rangées des lamelles métalliques montées sur un cadre. L'espace entre les lamelles doit être uniforme et convenir à l'espace entre les fils de chaîne. L'autre rôle du peigne est de contrôler la densité des fils de chaîne. Généralement, le compte en

chaîne du tissu final (le nombre des fils par centimètre) est environ 5% plus élevé de la densité du peigne à cause de contraction du tissu.

Le choix de la matière, l'épaisseur, et la forme des lamelles est très important et il dépend de plusieurs facteurs, la force de frappe, le type de dispositif d'insertion, la matière des fils de chaîne. La figure montre un peigne profilé pour une machine à tisser à jet d'air (le peigne joue également le rôle de confuseur) et un peigne normal.

Pour diminuer l'énergie absorbée par le dispositif de mouvement, le peigne doit être le plus léger possible tant en gardant sa rigidité et sa résistance à l'usure dû à la friction entre les dents du peigne et les fils de chaîne.

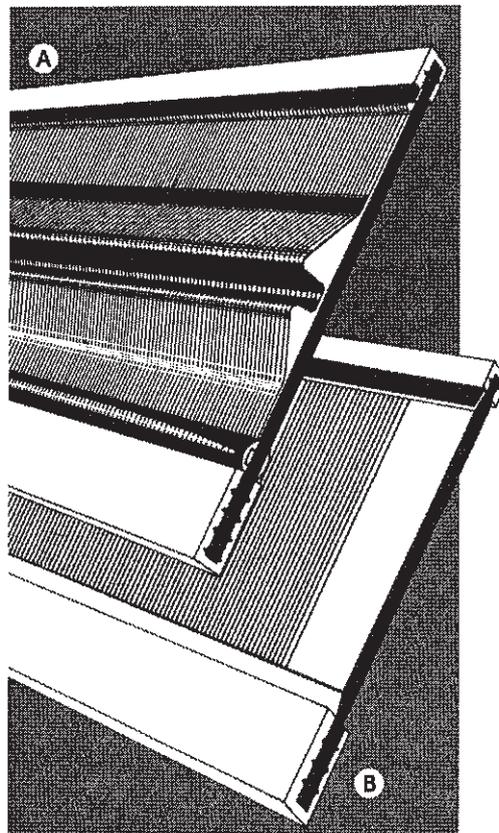


Figure 1-45 : A – Peigne profilé, B – Peigne Normal [ADA.01]

1.5.5. Enrouleur du tissu :

Après avoir poussé la duite contre la façade du tissu, un nouveau morceau de tissu vient d'être créé. Il faut donc tirer ce petit morceau de tissu pour laisser la place pour une nouvelle duite. Le dispositif d'appel permet d'avancer le tissu pour pouvoir ensuite le stocker par le dispositif d'enroulement. L'avancée du tissu doit être réglable en fonction du duitage désiré, c'est le rôle du régulateur de duitage.

Le duitage D étant exprimé en nombre de duites au centimètre, cette avance a est de $a = 1/D$ pour chaque tour de la machine à tisser (ou pour chaque insertion). La relation entre la vitesse de production P (donnée en mètres par minute) et la vitesse de la machine à tisser V (donnée en duites par minute) peut être donnée par l'équation suivante : $P = V \times a$

Cependant, il faut tenir compte du retrait du tissu qui est dû à la forte tension des fils sur la machine à tisser.

L'enrouleur du tissu doit permettre :

- d'avancer régulièrement le tissu,
- d'empêcher le glissement du tissu sur le dispositif d'appel,
- d'enrouler sans plis,
- de voir sur les deux faces du tissu,
- d'avoir la possibilité de couper les pièces de tissu sans arrêter la machine à tisser,
- d'avoir la possibilité de mesurer la longueur la pièce tissée.

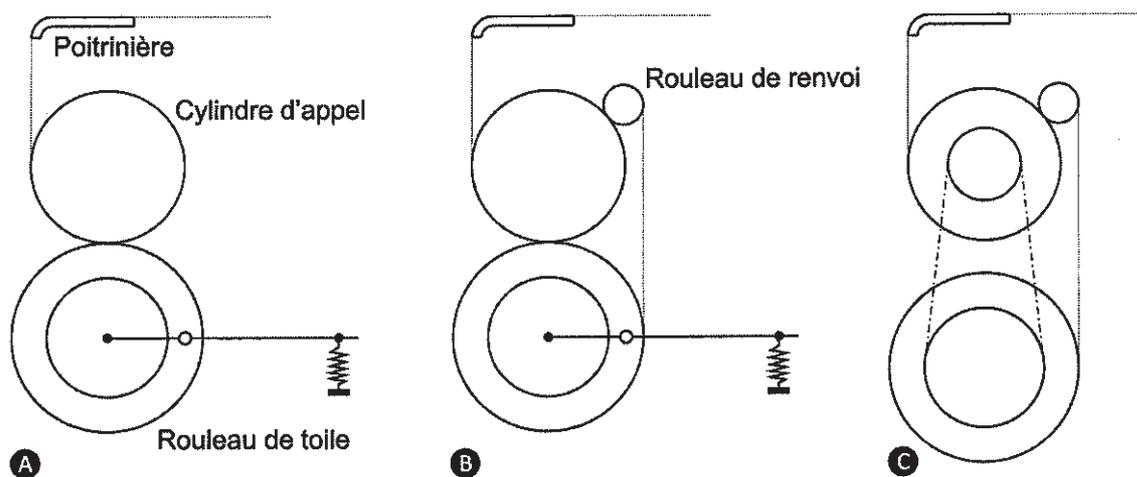


Figure 1-46 : Les principes d'enrouleur

Il y a trois types de l'enrouleur :

Entraînement direct : le cylindre d'appel est commandé positivement par le régulateur de duitage. Ce cylindre permet d'appeler le tissu en excluant tout glissement grâce à une garniture antidérapante. Le rouleau de toile est pressé par un ressort contre le cylindre d'appel et il est entraîné tangentiellement à partir de ce dernier. Le rouleau de toile permet d'enrouler le tissu final (Figure 1-46, A).

Le tissu, après avoir été plaqué sur environ la moitié de la superficie du cylindre d'appel, passe directement sur le rouleau de toile qui est simplement pressé contre le cylindre d'appel.

Entraînement avec renvoi : la seule différence avec le système précédent c'est l'existence d'un rouleau de renvoi en le cylindre d'appel et le rouleau de toile (Figure 1-46, B). Ce rouleau permet d'augmenter la surface de contact du tissu sur le cylindre d'appel et donc d'empêcher le glissement. Il permet également de couper le tissu sans avoir besoin d'arrêter la machine à tisser.

Enroulement axial : le rouleau de toile est entraîné positivement par son axe à partir du cylindre d'appel (Figure 1-46, C). Au cours du tissage, le diamètre du rouleau de toile augmente ce qui provoque l'augmentation de la vitesse tangentielle du rouleau de toile et l'augmentation de la tension du tissu entre le cylindre d'appel et le rouleau de toile. Afin de palier cette augmentation, la transmission du mouvement entre ces deux cylindres comporte un disque de friction. Ce système permet de tisser des pièces relativement longues.

Le régulateur de duitage entraîne régulièrement le cylindre d'appel selon le duitage désiré. Il prend son mouvement soit à partir de la mécanique du mouvement de peigne, soit à partir de l'arbre du moteur de la machine à tisser. L'entraînement du cylindre d'appel peut être à vitesse angulaire uniforme ou à pas intermittence.

1.6. L'avantage du tissage :

En général, l'avantage des étoffes réside dans leur faible rigidité de flexion. D'autres films minces peuvent être flexibles aussi mais leur module de cisaillement élevé les empêche d'être des matières « tombantes » (Figure 1-47).

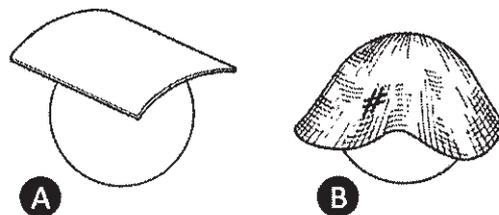


Figure 1-47 : A – Papier ou film mince, B – Tissu [LOR.82]

L'étoffe peut être obtenue par plusieurs techniques de fabrication : tricotage, non-tissés, ou tissage. Les avantages du tissage par rapport aux autres techniques sont :

- La possibilité d'utilisation de toutes les matières textiles.
- La possibilité d'utilisation des matières premières moins chères que le tricotage.
- La souplesse d'adaptation de la machine à tisser.
- La bonne stabilité dimensionnelle de tissu.
- La bonne résistance bidirectionnelle.
- La régularité du tissu.

Le tissu n'est plus maintenant utilisé uniquement dans le domaine de l'habillement et de l'ameublement mais ainsi dans d'autres secteurs industriels tels que l'agriculture (Figure 1-48, A), le génie civil (Figure 1-48, B), les vêtements de protection (Figure 1-48, C), le sport (Figure 1-48, D), le secteur médical, le transport « automobile, ferroviaire, aéronautique,... » (Figure 1-48, E).

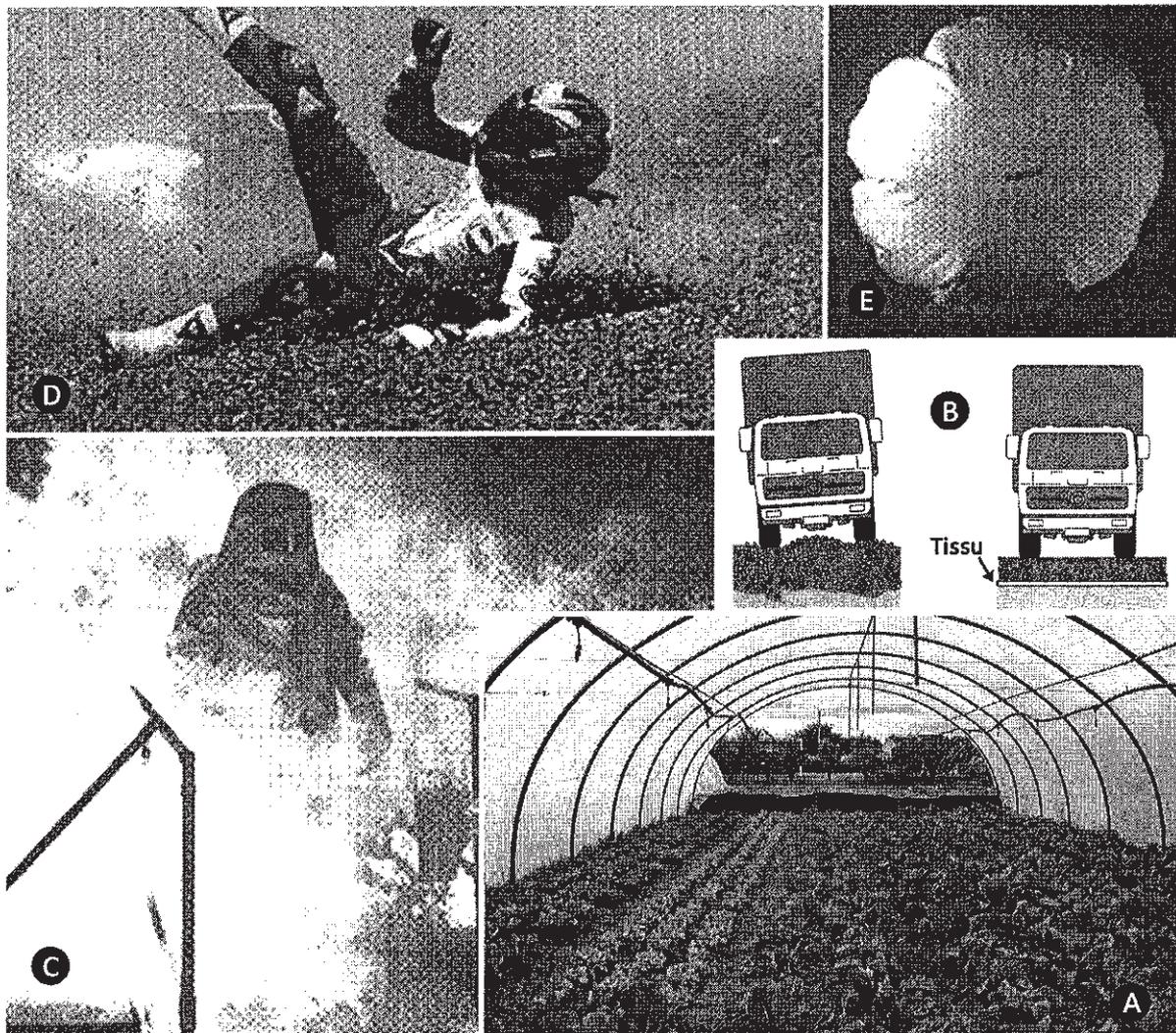


Figure 1-48 : L'utilisation du tissu technique [ADA.01]

Conclusion :

La largeur des machines à tisser actuelles varie entre 1,80 et 15 m. avec une vitesse d'insertion de l'ordre de 500 à 1000 duites/min et une vitesse de production de 10 à 25 m/h. Le nombre de fils de chaîne est de l'ordre de 2000 à 10000 avec un duitage de 20 à 60 duites/cm. Les machines à tisser actuelles permettent de tisser des fils de 10 à 100 tex soit un diamètre équivalent de 0,2 à 0,5 mm.

Si les machines à tisser actuelles peuvent réaliser dans des conditions acceptables le tissage de filaments fins en diminuant la vitesse de tissage et la tension sur les fils de chaîne, mais on peut constater l'incapacité des ces machines à tisser à réaliser du micro tissage. De ce fait, il semble nécessaire de reconcevoir les différentes parties de la machine à tisser pour le tissage des micro filaments en proposant des nouveaux mécanismes mieux adaptés au tissage à cette échelle. Ceci représente un changement d'échelle d'un facteur de 10 à 100. La diminution drastique de cette échelle nous obligera à prendre en compte les phénomènes de forces électrostatiques non prises en compte à l'échelle du tissage actuel. Par ailleurs, il paraît évident que les techniques d'usinage classique ne seront plus adaptées à la fabrication des dispositifs spécifiques à développer. Les technologies de micro usinage offre plusieurs méthodes pour la réalisation de micros systèmes électromécaniques MEMS et qui devrait nous permettre d'avancer dans la réalisation de notre projet.

2. Technologie des micros systèmes électromécaniques MEMS

2.1. Introduction :

En observant l'univers l'Homme a découvert l'existence des choses beaucoup plus grande que sa taille, les planètes, les étoiles et les astéroïdes. En revanche, l'invention du microscope optique au XVII^{ème} siècle a permis à l'homme de découvrir les microbes et les particules de taille microscopique.

Depuis la naissance du premier Homme sapiens il y a près de 400 mille ans et jusqu'au siècle dernier, toutes les objets ou les monuments que l'homme a construits avaient presque le même ordre de grandeur de sa taille 1 mètre, deux fois plus grandes ; 10^2 mètres ou deux fois plus petites 10^{-2} mètre (Figure 2-1). Sachant que l'ampleur de l'univers est de l'ordre de 10^{26} mètre, et la taille de la petite particule subatomique est de l'ordre de 10^{-26} mètre.

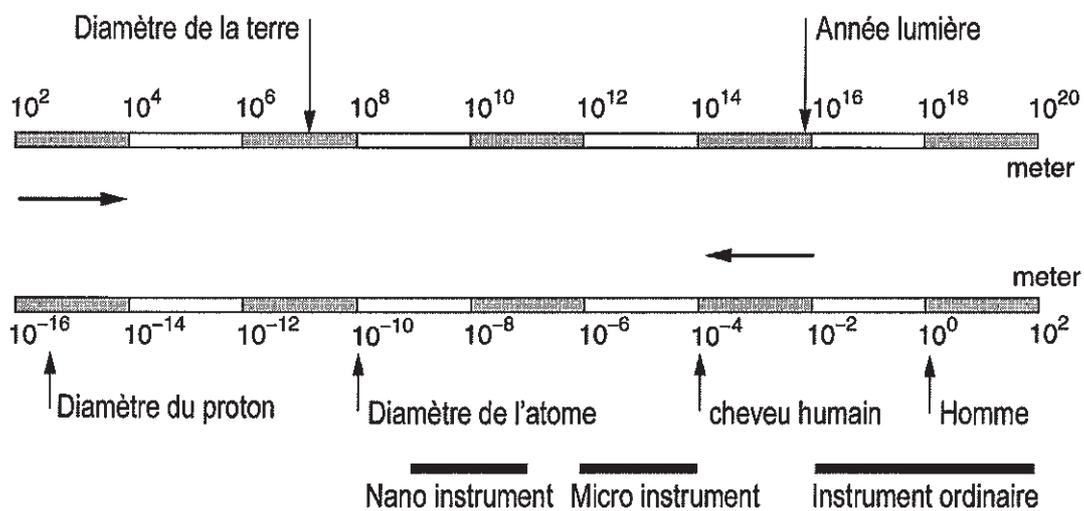


Figure 2-1 : Ordre de grandeur de différents objets [SCI.00]

La hauteur de la grande pyramide de Khéops qui a été construite environ 2500 Av-J.C. est de 147 mètres [WIK.00], pourtant la tour Eiffel qui a été construite en 1879 n'est que deux fois plus haute que la grande pyramide (324 mètre) [TOU.00]. Dans le cas inverse, la taille de quelques bijoux découverts dans les tombeaux des pharaons ne dépassaient pas 2 cm, tandis que l'envie de la fabrication des montres plus petites au XIII^{ème} siècle, a participé à l'art de miniaturisations des dispositifs de quelques millimètres.

Le XX^{ème} siècle était l'aube de la fabrication des circuits électroniques. Le premier transistor a été inventé par Bardeen et Brattain en 1947 [LIN.00]. L'intérêt de créer des transistors plus petits sur un seul support était de pouvoir diminuer la puissance absorbée et d'augmenter la fiabilité des transistors. Cet intérêt a poussé les ingénieurs pendant les soixante dernières

années à développer des méthodes de micro usinage, voire nano usinage. La figure 2-2 montre l'augmentation de nombre des transistors fabriqués sur un seul circuit intégré par rapport au temps (loi de Moore).

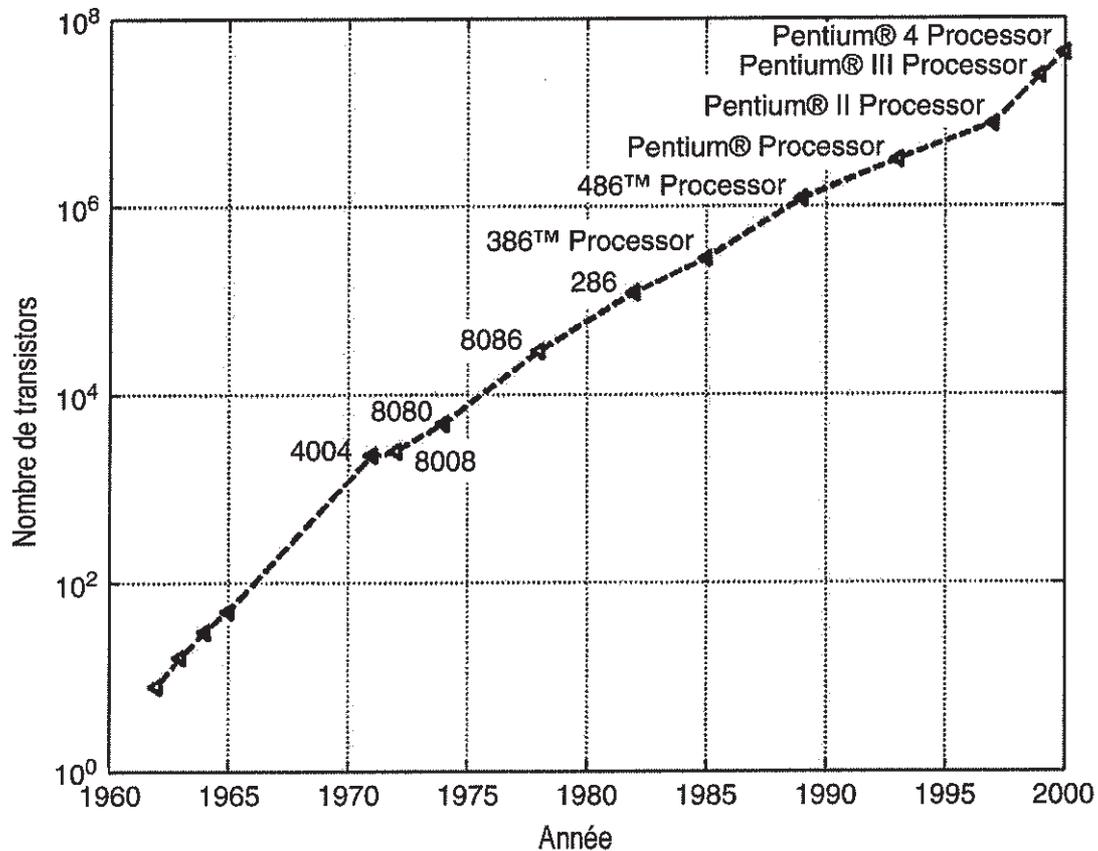


Figure 2-2 : L'augmentation de nombre des transistors dans un circuit intégré en fonction du temps [WIK.01]

La découverte de la propriété piézoélectrique des matériaux semi-conducteurs, utilisés pour fabriquer les transistors [SMI.54], a montré la possibilité de réaliser des dispositifs électromécanique. Le premier transistor à une porte résonnante a été inventé par Nathanson en 1967 [NAT.67]. Trois ans plus tard, en 1970 le développement de la technique de micro usinage sur un substrat de silicium a permis de réaliser des capteurs de pression et des accéléromètres. Cette méthode a été également utilisée pour fabriquer des orifices de tête d'impression. Ce qui est devenu par la suite un grand marché commercial grâce au besoin de la révolution de l'ordinateur pour des imprimantes de bureau à bas-prix.

En 1983, Howe and Muller [HOW.83] ont développé une méthode de micro usinage surfacique. Cette méthode utilise deux types de matériaux, matériau de la structure et matériau sacrificié. Elle permet de fabriquer des éléments mécaniques complexes sans avoir besoin d'une étape d'assemblage postérieure.

Egalement en 1980, une autre méthode de fabrication LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung) [BEC.86] a été développée en Allemagne. Elle permet de réaliser des structures avec un grand rapport de dimensions (rapport hauteur ou épaisseur sur largeur) en utilisant un moulage plastique.

Toutes les méthodes précédentes de micro fabrications et d'autres méthodes, qui seront détaillées postérieurement, ont permis de développer les technologies de fabrication de micro système électromécanique MEMS.

Les micros systèmes électromécaniques MEMS présentent tous les dispositifs ayant des dimensions plus petites qu'un millimètre mais plus grandes qu'un micron (Figure 2-1), et qui utilisent des composants électriques et mécaniques.

Les systèmes MEMS ont été utilisés dans tous les domaines physique, chimique, biologique, automobile et spatial. Ils ont permis de développer des prototypes d'actionneurs électrostatiques, magnétiques, électromagnétiques, pneumatiques ou thermiques, des moteurs, des valves, des pignons, des capteurs de pression et des capteurs de vitesse, de dimensions inférieures à 100 μm . Ils sont intégrés également dans des systèmes plus complexes ; par exemple : robots, micro laboratoire (lab-on-chip) ou micro pompe à chaleur. À partir de l'année 1990, les applications des systèmes MEMS ont explosé dans plusieurs domaines industriels et médicaux : accéléromètre pour les systèmes des coussins gonflables « Airbag » [TAN.89], capteur de vitesse pour les systèmes de frein ABS, matrice de micro miroirs pour un système de projection optique à haute définition, des pinces dans les microscopes électroniques, micro refroidisseur pour des circuits intégrés, réacteur de séparation des micro cellules, analyseur de sang, micro pompe pour les imprimantes à jet d'encre, diode laser...

Les applications des systèmes MEMS ne cessent pas de grandir grâce à la possibilité d'utiliser plusieurs méthodes de micro usinage en même temps et au pouvoir d'intégrer une multitude de composants électroniques et mécaniques dans un seul système. Le marché commercial des systèmes MEMS grandit à un taux annuel de 25% [COL.08].

2.2. L'effet de diminution de l'échelle :

Avant de procéder à la fabrication des systèmes MEMS, il faut comprendre comment les phénomènes physiques se comportent en changeant l'échelle de dimensions. Ceci nous

permet d'étudier la fiabilité d'un système MEMS et de prévoir si le système va fonctionner dans de bonnes conditions.

La figure 2-1 nous permet de distinguer plusieurs échelles : l'échelle des objets astronomiques, l'échelle des objets qui nous entourent ou l'échelle macroscopique, l'échelle des objets microscopiques, l'échelle des nano objets, et l'échelle des composantes atomiques.

Les forces dominantes dans une échelle n'ont aucun effet perceptible dans une autre échelle, par exemple la force de gravitation est la seule force prise en compte pour calculer l'équilibre des plantes et les étoiles. Le mouvement de la Lune autour de la Terre et le mouvement de la Terre autour du Soleil sont dominés par la force de gravitation. Cependant, en changeant l'échelle, la force de gravitation entre le stator et le rotor d'un moteur électrique est souvent négligée et c'est la force électromagnétique qui est la force dominante.

En changeant encore l'échelle, on pense que pour fabriquer un micro moteur (micro actionneur) il faut utiliser le champ magnétique pour produire la force mais contrairement à toute attente c'est le champ électrostatique qui présente le plus d'intérêt.

Afin de mieux comprendre comment ces phénomènes physiques changent en changeant l'échelle, on va étudier la théorie de l'échelle.

Les paramètres physiques changent en modifiant l'échelle [TRI.89]. Considérant le facteur de dimensions S , le facteur $S=10$ signifie que l'objet est devenu dix fois plus grand, le facteur $S=1/10$ signifie que la taille de l'objet est diminuée du facteur dix.

Quand le facteur S change, toutes les dimensions de l'objet changent du facteur S , la surface de l'objet change du facteur S^2 et son volume change du facteur S^3 , la force de tension surfacique change du facteur S^1 , la force électrostatique change du facteur S^2 , la force magnétique change du facteur S^3 et la force de gravité change du facteur S^4 .

On peut donc considérer quatre types de loi de force exercée sur un système, ils sont présentés sous la forme de la matrice suivante :

$$F = \begin{bmatrix} S^1 \\ S^2 \\ S^2 \\ S^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Tension surfacique} \\ \text{Electrostatique, Pression, Biologique} \\ \text{Magnétique (J = S}^{-0,5}\text{)} \\ \text{Gravitation, Magnétique (J = S}^0\text{)} \end{bmatrix} \quad \text{Équation 2-1}$$

Avec J densité de la bobine de l'actionneur électromagnétique

Afin de mieux comprendre l'équation précédente, on va calculer le changement de la force de gravitation en modifiant l'échelle. La force de gravitation F entre deux masses M_1 et M_2 est donnée par l'équation suivante :

$$F = G \times \frac{M_1 \times M_2}{r^2} \quad \text{Équation 2-2}$$

Où G est la constante gravitationnelle ($= 6,670 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$) et r la distance entre les deux masses.

Or les deux masses M_1 et M_2 peuvent être données par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} M_1 &= \rho_1 \times V_1 \\ M_2 &= \rho_2 \times V_2 \end{aligned} \quad \text{Équation 2-3}$$

Où ρ_1 et ρ_2 sont les densités des masses M_1 et M_2 respectivement.

Donc on peut écrire la force de gravitation F :

$$F = G \times \frac{\rho_1 \times V_1 \times \rho_2 \times V_2}{r^2} \quad \text{Équation 2-4}$$

En modifiant l'échelle S , la constante gravitationnelle et la densité de matériaux restent constante (changement du facteur S^0), la distance r change du facteur S^1 , le volume change du facteur S^3 et la force de gravitation change du facteur :

$$F = \left[S^0 \times \frac{S^0 \times S^3 \times S^0 \times S^3}{(S^1)^2} \right] = [S^4] \quad \text{Équation 2-5}$$

Quand les dimensions diminuent de facteur de 10^3 ($S=10^{-3}$) ce qui le cas du passage de l'échelle millimétrique à l'échelle microscopique, la force due à la tension surfacique diminue de facteur 10^3 , la force due au champ électrostatique diminue du facteur 10^6 , la force due au champ magnétique diminue du facteur 10^9 et la force de gravité diminue du facteur 10^{12} . En effet, la force due à la tension surfacique devient la force dominante. Ceci peut nous expliquer pourquoi un grain de sable de taille microscopique (poussière) peut « flotter » sur l'eau.

Pour la même raison, l'utilisation de la force électrostatique pour la conception des micros actionneurs devient plus intéressante que l'utilisation de la force générée par un champ électromagnétique [Equation 2-1]. À l'échelle microscopique la force des muscles (proportionnelle à la surface de la section du muscle) et la force générée par la pression deviennent importantes.

2.3. Les matières de base utilisées pour la fabrication des MEMS :

2.3.1. Silicium mono cristallin :

L'utilisation des propriétés piézoélectriques du silicium pour fabriquer des micros capteurs d'allongement et des micros systèmes MEMS date de l'année 1954 [SMI.54]. Le silicium mono cristallin est un matériau semi-conducteur, sa structure cristalline est cubique [KIT.76]. Il est extrait du sable et raffiné avec des processus de production industrielles peu coûteuse pour fabriquer des substrats de mono cristal de silicium de diamètre allant jusqu'à 30 cm (100 mm avec une épaisseur de 525 μm , 150 mm avec une épaisseur de 650 μm). Il peut être dopé par le Phosphore ou le Bore pour fabriquer des jonctions de type N ou P respectivement. Mécaniquement, le silicium est une matière fragile avec un module de Young élevé 160 GPa et une limite d'élasticité de 7 GPa proche à ceux de l'inox et une densité $2,32 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ plus léger que l'aluminium.

Le substrat du mono cristal de silicium est utilisé comme une plateforme mécanique sur laquelle les structures de micro dispositifs seront fabriquées soit en silicium ou soit par d'autres matières. Il présente également une matière la plus convenable pour le micro usinage sur un substrat.

En plus, la stabilité des propriétés mécaniques de silicium, sa propriété piézoélectrique et la possibilité de le doper avec plusieurs éléments chimiques offrent un autre avantage à l'intégration des composants mécaniques et électriques sur un même substrat de silicium.

L'avancement rapide du domaine électronique qui utilise le substrat du mono cristal de silicium pour la fabrication des composants électroniques a permis d'offrir plusieurs méthodes de micro usinage et de développer rapidement la fabrication des systèmes MEMS.

2.3.2. Le poly silicium :

Le poly silicium (poly cristallin) est composé de petits unique domaines de cristal appelés les grains, dont les orientations et/ou l'alignement varient par rapport à l'autre. La rugosité souvent observées sur les surfaces de poly silicium est due à la nature granulaire du poly silicium [KAM.98].

Le film de poly silicium est fabriqué par un dépôt de vapeur chimique à basse température LPCVD [ROS.77]. La microstructure du poly silicium déposée dépend des conditions de dépôt.

Le poly silicium représente une matière attractive pour la méthode de micro usinage surfacique grâce à ses propriétés comparables aux propriétés de silicium mono cristallin. En effet, le poly silicium peut être également dopé et recouvert par une couche de SiO₂. Il résiste également aux agents de gravure de SiO₂.

2.3.3. Le PDMS :

Le PDMS est un élastomère, il possède des très bonnes propriétés physiques et chimiques. C'est une matière transparente, sa température de transition vitreuse est très basse. Le PDMS offre une surface avec une faible énergie libre inter-faciale (environ $21,6 \times 10^{-5}$ N/cm), il possède une bonne stabilité chimique et thermique (environ 186°C) [XIA.98]. Les propriétés inter-faciales de PDMS peuvent être modifiés facilement soit en modifiant le pré-polymère soit par un traitement plasma de la surface de PDMS. Le PDMS et son catalyseur sont disponibles commercialement en large quantité et il est proposé par plusieurs sociétés : Dow Corning « Sylgard 184 », Hüls America.

2.3.4. Le SU-8 :

Le SU-8 est une époxy photo-plastique, il est sensible aux rayons ultra violet. Il permet de réaliser des reliefs avec un rapport de dimensions élevé par un processus photolithographique. Il peut être appliqué par un « spin coater » pour avoir une mono couche d'une épaisseur comprise en 1 et 300 µm ou de plusieurs couches d'une épaisseur totale allant jusqu'à 2 mm [MUR.93]. Il a une bonne stabilité chimique. Le SU-8 adhère bien sur le silicium ou l'or. Cependant, la force d'adhésion avec l'oxyde de silicium ou avec le verre est très faible, ainsi la différence entre le coefficient de dilatation de SU-8 et le silicium est grande [XIA.98], ce qui limite son utilisation avec ces matériaux.

Le SU-8 est utilisé pour réaliser des structures avec des micros reliefs en utilisant des processus de modelage plastique ou par dépôt électrique de métal [MUR.93] [DUF.99].

2.4. Le micro usinage par gravure de substrat de silicium :

Cette méthode de micro usinage permet de fabriquer des micros dispositifs MEMS dans un substrat de mono cristal de Silicium en utilisant les méthodes de gravure utilisées pour réaliser les composants électroniques.

Les avantages de l'utilisation du silicium comme une matière première pour cette méthode de micro usinage sont :

- la possibilité de réaliser des gravures isotropes ou anisotropes en utilisant des techniques de gravures humides ou sèches,
- la facilité de fabriquer un masque de protection compatible avec le silicium et qui peut être utilisé avec les agents de gravure.

Le micro usinage d'un substrat de mono cristal de silicium s'effectue en gravant des reliefs et des structures dans le silicium. Généralement, les méthodes de gravure consistent à appliquer un masque de protection pour pouvoir protéger les régions du substrat qui ne doivent pas être éliminées de l'effet des agents de gravure.

Selon le type des agents utilisés, la gravure peut être isotrope ou anisotrope. Dans le cas de gravure isotrope, la vitesse de gravure est la même dans toutes les directions. Par contre dans le cas de la gravure anisotrope, la vitesse de gravure dans le sens perpendiculaire à la surface du substrat est plus élevée que la vitesse latérale dans les deux autres directions. Ce qui permet de réaliser des gravures avec un rapport de dimension plus élevé. La figure 2-3 montre la différence entre la section d'un orifice sculpté par une gravure isotrope et la section d'un autre orifice du même diamètre sculpté par gravure anisotrope).

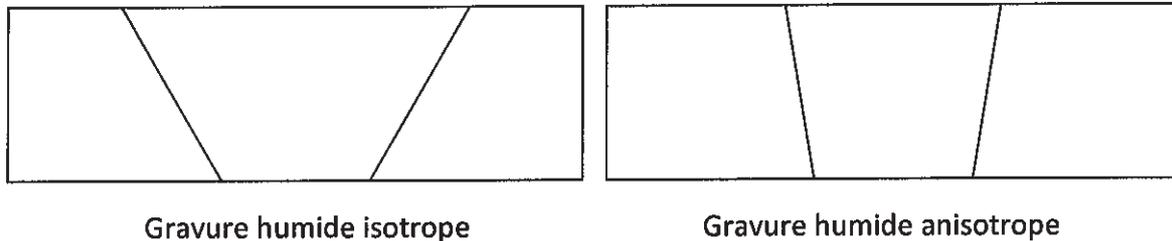


Figure 2-3 : La différence entre gravure isotrope et gravure anisotrope

La méthode de gravure humide date au XV^{ème} siècle, elle a servi à décorer les armures des chevaliers [DUR.57]. La découverte de masques photosensibles par Niépce en 1822 a permis d'améliorer la précision de gravure. L'association entre la méthode de gravure humide et la lithographie a été utilisée dans le domaine industriel pour fabriquer avec une bonne précision les lettres des anciennes machines à imprimer, décorer les bijoux ou réaliser les cartes de circuits imprimés...

En 1959, Robbins and Schwartz ont proposé un processus de gravure isotrope sur un substrat de mono cristal de silicium similaire au processus de fabrication à l'échelle macroscopique mais avec une précision plus élevée convenant à la fabrication de micro système MEMS [ROB.59].

En 1960, le laboratoire de Bell Telecom a développé une méthode de gravure anisotrope qui permet de sculpter dans un substrat de mono cristal de silicium des systèmes MEMS avec un rapport de dimensions plus élevé de l'ordre de 5.

2.4.1. Le processus de gravure isotrope humide :

La figure 2-4 montre les étapes de base de cette méthode. Elles peuvent être séparées en deux étapes principales :

1. Préparation du masque :

La réalisation de masque par un simple processus de lithographie est impossible car la couche photosensible ne peut pas résister à l'agressivité de l'agent de gravure. Généralement, le masque est une couche d'oxyde de silicium préparée selon les étapes suivantes :

- application d'une couche fine d'oxyde de silicium SiO_2 généralement par voie thermique sur le substrat de silicium.
- étalement d'une couche de matière photosensible, exposition de cette couche au rayon ultraviolet à partir d'un masque (film imprimé), puis développement de cette couche.
- Gravure de la couche d'oxyde de silicium pour fabriquer le masque de gravure de silicium.

2. Graver le substrat :

L'agent de gravure le plus utilisé est un mélange d'acide nitrique HNO_3 et d'acide fluorhydrique HF. Le mélange peut être dilué dans l'eau mais l'acide acétique CH_3COOH est préférable car il empêche la dissociation de l'acide nitrique qui garde son pouvoir d'oxydation [ROB.60]. Ce mélange s'appelle souvent HNA. Il agit sur le silicium et il attaque les régions du substrat qui ne sont pas recouvertes par la couche d'oxyde de silicium. La vitesse de gravure est relativement rapide de l'ordre de $50 \mu\text{m}/\text{min}$ [KER.78] et elle est la même dans toutes les directions « gravure isotrope ». L'agressivité du mélange attaque également la couche d'oxyde de silicium mais avec une vitesse moins importante de l'ordre de $0,03$ à $0,08 \mu\text{m}/\text{min}$.

La vitesse de gravure dans le silicium par le HNA peut être réduite d'un facteur 150 en dopant le silicium par le bore ou l'azote [MUR.73]. Malgré cette réduction de vitesse de gravure, l'exploitation de cette méthode dans le domaine industriel a échoué [SEI.89].

Le processus de gravure isotrope humide est couramment utilisé pour : enlever de façon rapide une zone à éliminer, arrondir les coins des structures réalisées par une méthode de

gravure anisotrope et améliorer la rugosité de surface, sculpter une structure dans un substrat de mono cristal de silicium.

L'inconvénient de cette méthode se résume à la difficulté de réaliser un masque d'oxyde de silicium avec une précision et de contrôler la géométrie latérale et verticale de la structure gravée.

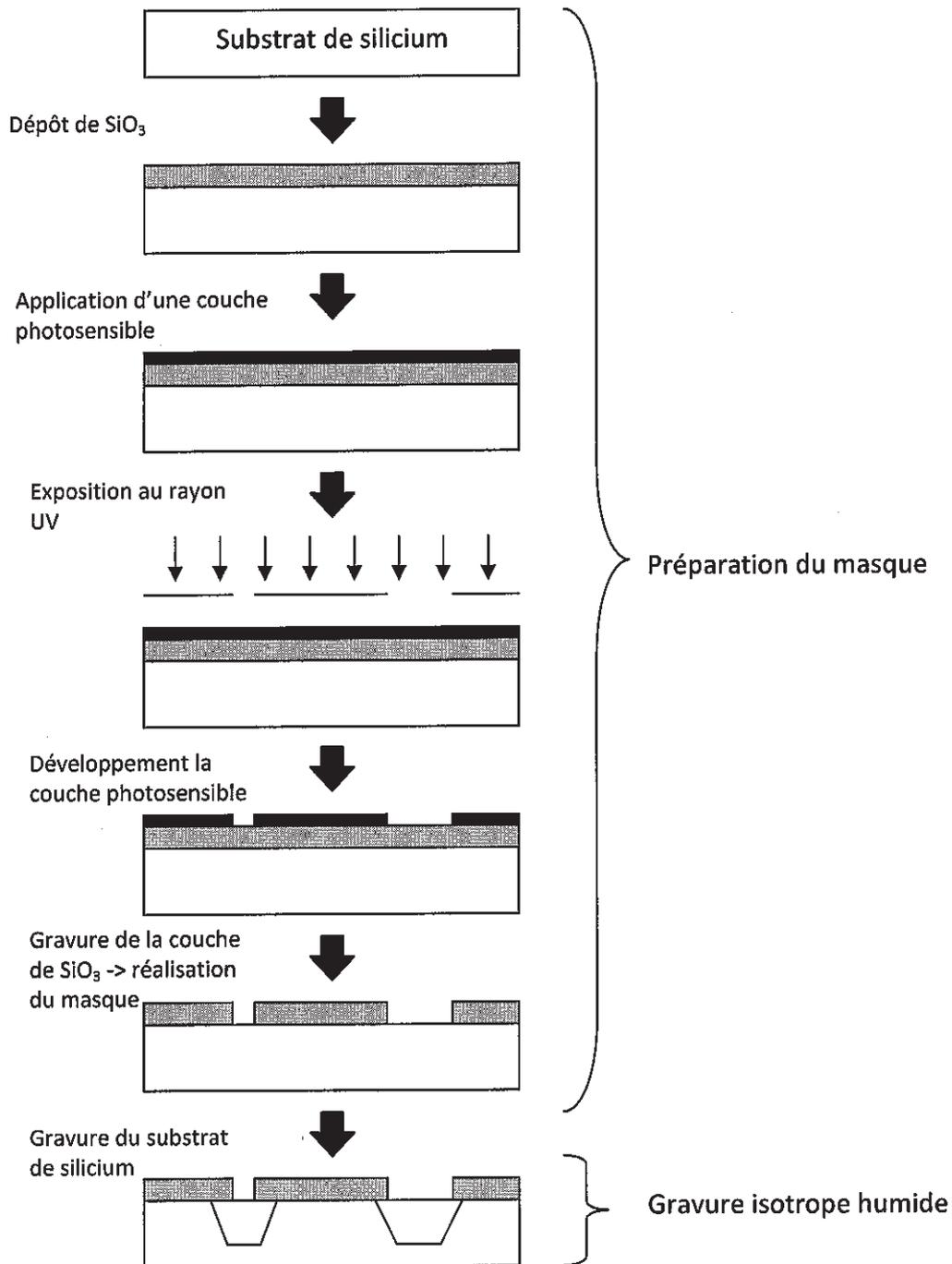


Figure 2-4 : Principe de gravure isotrope humide du substrat de silicium

2.4.2. Le processus de gravure anisotrope humide :

C'est un processus similaire à la méthode de gravure isotrope humide, la différence réside dans l'utilisation d'agent de gravure de nature basique. Plusieurs solutions chimiques peuvent être employées KOH, NaOH, LiOH, CsOH, RbOH, NH₄OH. Le choix de l'agent de gravure dépend de plusieurs critères : la vitesse de gravure, la toxicité, le type et l'épaisseur du masque, la compatibilité avec les processus de fabrication de circuits intégrés, et la possibilité de sélectionner les matériaux à graver.

La solution d'hydroxyde de potassium KOH dans l'eau est l'agent de gravure anisotrope le plus employé, une solution presque saturée de KOH dans l'eau (concentration 50%) à 80°C permet d'obtenir des surfaces uniformes et brillantes avec une vitesse de gravure relativement faible de l'ordre de 1,4 µm/min [WIL.96].

L'uniformité se dégrade considérablement en augmentant la température à cause de la formation des bulles sur la surface qui jouent d'un rôle de micro masque. L'utilisation de masque d'oxyde de silicium n'est pas possible dans le cas de la fabrication des reliefs de grande profondeur car la vitesse de gravure de silicium est proche de la vitesse de gravure de l'oxyde de silicium [LAM.92]. Une couche de haute densité de nitrure de silicium réalisée par un dépôt de vapeur chimique à basse pression LPCVD est donc utilisée comme un masque. Cette couche résiste mieux au KOH avec une vitesse de gravure faible de l'ordre de 0,1 nm/min [PUE.91]. Cette couche est également facile à modeler à l'aide d'une couche photosensible et un agent de gravure comme CF₄/O₂ Plasma.

Dans certains cas où il faut contrôler avec précision la profondeur de gravure (le cas de fabrication d'une membrane), une technique permettant d'arrêter la gravure doit être utilisée. Elle consiste à doper le substrat de silicium par une couche de type N ou P. Le choix du type de couche dépend de l'agent de gravure. Une couche dopée par le bore avec une concentration supérieure à 5x10⁸ cm⁻³ est utilisée avec l'agent de gravure KOH, elle permet de diminuer considérablement la vitesse de gravure. La figure 2-5 montre les étapes de fabrication d'un orifice avec une épaisseur contrôlée.

Une couche de type P est déposée puis modelée à l'aide d'un masque photosensible et un agent de gravure. Deux autres couches de nitrure de silicium ont été déposées sur les deux côtés du substrat de silicium. Elles servent comme un masque. La couche inférieure est également modelée. La solution de KOH attaque principalement le substrat de silicium et permet de sculpter l'orifice avec une épaisseur contrôlée et égale à l'épaisseur de la couche de type P.

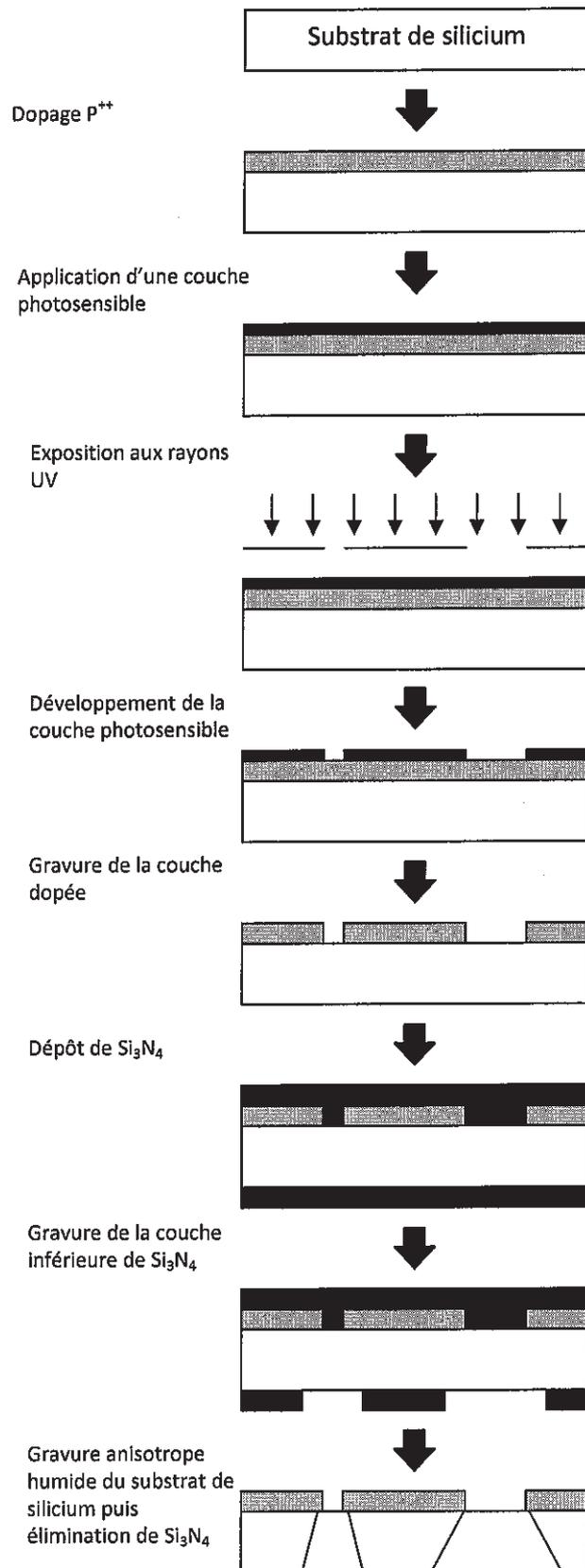


Figure 2-5 : Principe de gravure anisotrope humide avec un contrôle de la profondeur de gravure

Le processus de gravure anisotrope humide permet de réaliser des structures dans un substrat de mono cristal de silicium avec un rapport de dimensions élevé mais c'est un processus relativement lent et il produit des surfaces rugueuses. La diminution de concentration de KOH permet d'améliorer la rugosité mais elle diminue considérablement la vitesse de gravure.

2.5. La méthode de micro usinage surfacique :

Contrairement à la méthode de micro usinage de substrat de mono cristal de silicium, le micro usinage surfacique construit couche par couche la micro structure sur un substrat de mono cristal de silicium. Une gravure sèche permet de définir les traits des structures dans le plan, et une gravure humide permet de les réaliser. La nature de processus de dépôt des couches limite la hauteur de la structure obtenue par cette méthode en quelques micromètres, ce qui présente un désavantage par rapport au micro usinage dans un substrat où la hauteur de la structure n'est limitée que par l'épaisseur du substrat.

Malgré les désavantages des propriétés mécaniques et piézoélectriques de poly-silicium par rapport aux propriétés de mono cristal de silicium, il reste intéressant par rapport aux métaux surtout grâce à ses propriétés isotropes qui facilitent la conception par rapport au mono cristal de silicium [GRE.95] [BER.96].

La première idée du micro usinage surfacique a été développée par Nathanson en 1967 pour réaliser un transistor à grille résonante. Mais le processus de micro usinage surfacique telle qu'il est employé maintenant et qui utilise le poly-silicium comme matière de structure a été proposé par Howe et Muller en 1980 [HOW.82].

La figure 2-6 montre les différentes étapes du processus de micro usinage surfacique. Il consiste à :

1. Enduire le substrat de mono cristal de silicium par une couche de matière diélectrique de type N^+ suivi par un dépôt d'une couche isolante. La réalisation de la couche isolante s'effectue par un dépôt de vapeur chimique à basse pression LPCVD d'une couche de nitrure de silicium sur une couche d'oxyde de silicium formée par voie thermique.

2. Réaliser la couche de base ou la couche sacrifiée par un dépôt de vapeur chimique à basse pression LPCVD d'une couche de verre de phosphosilicate « PSG ». L'addition du phosphore à l'oxyde de silicium SiO_2 pour fabriquer le PSG permet d'augmenter considérablement

la vitesse de gravure de SiO_2 dans l'acide fluorhydrique [MON.92]. l'augmentation de vitesse de gravure permet d'éliminer facilement la couche sacrificielle. Le PSG tient donc comme la meilleure matière pour la réalisation de la couche sacrificielle. Pour obtenir une gravure uniforme, la couche de PSG doit être densifiée en chauffant le substrat de silicium entre 950°C à 1100°C [YUN.92]. une fois la couche de PSG est déposée, un premier masque permet de graver cette couche par un processus de gravure sèche.

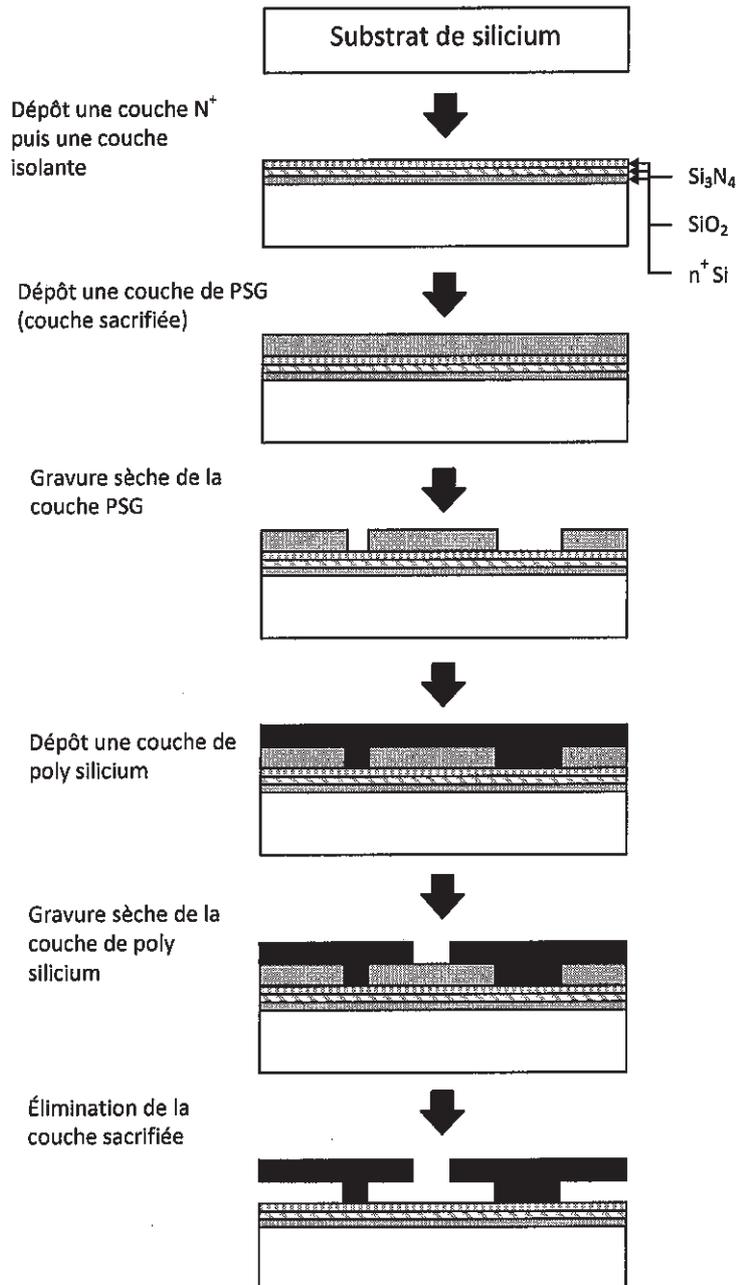


Figure 2-6 : Principe de micro usinage surfacique

3. Déposer le matériau de structure par un dépôt de vapeur à basse pression LPCVD de poly-silicium, cette étape est relativement lente (taux de dépôt de l'ordre de $100 \text{ \AA} / \text{min}$). La couche de poly-silicium doit être cuite à 1050°C dans l'azote pendant une heure pour réduire les contraintes intérieures. Un autre processus de dépôt CVD a été développé par Lange [LAN.96], il permet de réaliser une couche avec une vitesse de dépôt relativement plus élevée $0,55 \mu\text{m}/\text{min}$ mais avec une rugosité de surface moins bonne ce qui empêche certaines applications. Un deuxième masque permet de graver cette couche par un processus de gravure sèche $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ plasma.

4. Finalement, un processus de gravure humide permet d'éliminer la couche sacrifiée en laissant la structure de poly-silicium. C'est pourquoi la vitesse de gravure de la couche sacrifiée doit être plus élevée que la vitesse de gravure de poly-silicium et la vitesse de gravure de la couche d'isolation. Le choix de l'agent de gravure s'effectue donc en respectant cette règle.

L'avantage de processus de micro usinage surfacique c'est qu'il est compatible avec les processus de la fabrication des circuits intégrés CMOS et il permet de fabriquer des dispositifs de petite taille.

L'usage de poly-silicium résout beaucoup de difficultés majeures associées au micro usinage de substrat de silicium. Il offre de nouveaux degrés de liberté pour la conception de micro capteurs et de micro actionneurs en augmentant les possibilités des formes des structures qui peuvent être réalisées. Le processus de micro usinage surfacique présente une méthode de fabrication par superposition de couches, ce qui permet de réaliser des structures pré assemblées.

2.6. Le processus de micro usinage LIGA :

Une couche épaisse sensible au rayon X exposée à une radiation de haute énergie de rayons X et développée permet de réaliser un moule de structure tridimensionnelle. Une méthode de dépôt de métal sert à remplir la structure par un métal. Une fois la matière sensible aux rayons X enlevée, la structure métallique peut être utilisée directement comme produit final ou peut servir comme un moule pour reproduire d'autres structures par un moulage plastique (Figure 2-8).

Le processus LIGA est un processus utile pour la fabrication des micro structures grâce à sa capacité à produire des formes de matériaux et tailles différents avec une haute précision et grand rapport de dimension de l'ordre de 320 [JIA.03].

Les équipements utilisés pendant la procédure de la fabrication du moule rendent ce processus relativement cher. Cependant, la réplcation des structures par moulage plastique présente une méthode de fabrication économique.

L'électrodépôt de l'or dans les reliefs d'une couche sensible aux rayons X a été développé par Romankiw en 1975 [SPI.76]. L'étape de moulage plastique a été intégrée au processus par Ehrfeld en 1982 [BEC.82]. Cette étape a permis de faire naître un processus de micro usinage LIGA capable de reproduire des micros structures à un faible coût.

Les différentes étapes du processus LIGA :

1. La fabrication du masque :

La fabrication du masque de rayons X est l'étape la plus difficile du processus de lithographie aux rayons X. Le substrat du masque doit en effet avoir une très faible épaisseur [LAW.89] pour être transparent au rayon X, avoir une stabilité chimique et physique après plusieurs utilisations sans provoquer une distorsion de rayon X, avoir une contrainte résiduelle faible et être facile à aligner avec le substrat à graver. La couche absorbante du masque doit être relativement épaisse d'une matière qui a un numéro atomique élevé pour pouvoir absorber les rayons X.

Généralement, le titane ou le béryllium sont utilisés pour la fabrication du substrat du masque mais le béryllium est plus transparent que le titane et son module de Young est plus élevé. L'or est utilisé pour la fabrication de la couche absorbante du masque.

Le substrat du masque est fabriqué en déposant une couche fine sur un substrat de silicium puis en enlevant le substrat du silicium par gravure humide. Le substrat du masque est collé par la suite sur un support afin d'augmenter sa rigidité et faciliter sa manipulation (Figure 2-7).

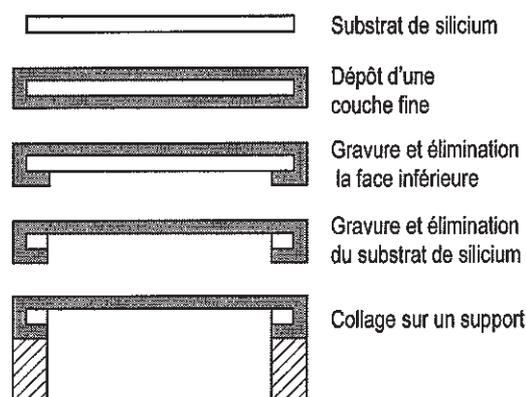


Figure 2-7 : La fabrication de la couche de base du masque

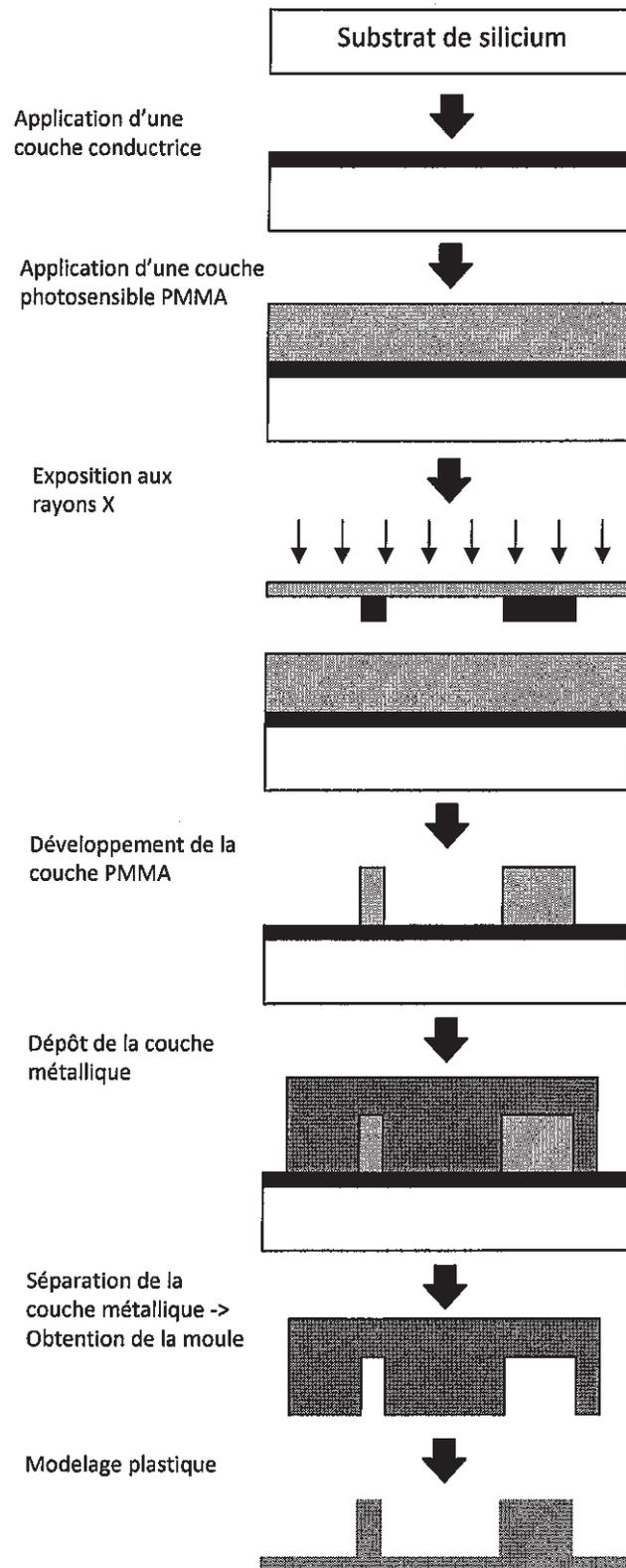


Figure 2-8 : Principe de la méthode du micro usinage LIGA

Le dépôt d'une couche relativement épaisse de matière absorbante demande deux étapes de fabrication en utilisant un masque intermédiaire. La fabrication du masque intermédiaire se fait par un processus de lithographie traditionnelle avec une épaisseur de la couche

photosensible de l'ordre de $3\mu\text{m}$. les reliefs de ce dernier sont remplis par un dépôt électrique d'une couche absorbante de rayons X. La couche photosensible est enlevée et le masque intermédiaire est prêt. Ce dernier sert à imprimer le dessin de la structure sur une couche sensible aux rayons X relativement épaisse ($20\mu\text{m}$) déposée sur le substrat du masque. Après le dépôt de la couche absorbante aux rayons X et l'élimination de la couche sensible, le masque est obtenu.

L'alignement entre la masque et le substrat à graver est difficile car la plupart des masques de rayons X sont opaques à la lumière normale ce qui pose un grand problème pendant la phase d'alignement. Plusieurs techniques ont été trouvées pour faciliter cette étape : ouverture d'une fenêtre dans le masque, détection de repères métalliques, fabrication du masque directement sur le substrat à graver...

2. La fabrication du substrat à graver :

Le substrat primaire ou le substrat de base doit être conducteur ou enduit d'une couche conductrice de l'électricité. Ceci est nécessaire pour l'étape de dépôt électrique. Le substrat doit avoir également une bonne adhésion avec la couche sensible aux rayons X. plusieurs matériaux ont été utilisés comme matériaux de base : aluminium, cuivre plaqué d'or, silicium plaqué chrome ou argent...

La couche sensible aux rayons X doit avoir une résolution élevée, une bonne résistance aux processus de gravure humide et sec, une bonne stabilité thermique, et une bonne adhésion avec le substrat de base. La couche sensible aux rayons X non exposée aux rayons X doit être absolument insoluble pendant le processus de développement. Elle doit également être compatible avec le dépôt électrique qui permet de fabriquer la structure voulue.

Le PMMA est la matière la plus utilisée comme couche sensible aux rayons X vu ses bonnes propriétés et sa stabilité pendant les différentes étapes de fabrication.

La couche de PMMA peut être appliquée sur le substrat de base soit en déposant plusieurs couches de PMMA sur le substrat de base à l'aide d'un « spin coater » ou moulée, soit en collant une lame de PMMA sur le substrat à l'aide d'un solvant ou en coulant un mélange de PMMA et d'un catalyseur. Le mélange doit être dégazé pour éliminer les bulles d'air dans le mélange.

3. Exposition et développement :

Le temps, la densité et la longueur d'onde de rayons X émis par le cyclotron pour imprimer les reliefs sur la couche sensible aux rayons X jouent un rôle très important sur la qualité et

la finition des reliefs. Une simulation numérique permet de calculer les paramètres optimaux de l'impression [MOH.88].

Concernant le choix du développeur, la vitesse de dissolution de la matière sensible exposée aux rayons X doit être 1000 fois plus rapide que la vitesse de dissolution de la matière sensible non exposée aux rayons X.

4. Le dépôt de la couche métallique :

Le substrat de base qui supporte la couche sensible aux rayons X sert de cathode. Le dépôt électrique permet de déposer le métal entre les rainures des reliefs et de les remplir. Une étape de finition permet d'homogénéiser la hauteur des différents reliefs de la structure métallique. Un agent solvant permet d'éliminer la couche sensible et d'obtenir une structure métallique avec des micros reliefs. La couche peut être éliminée également par une réexposition aux rayons X.

Cette structure peut être utilisée directement (Figure 2-9) ou elle peut servir comme un « master » pour pouvoir répliquer d'autres structures par modelage plastique (fabrication de CDs).

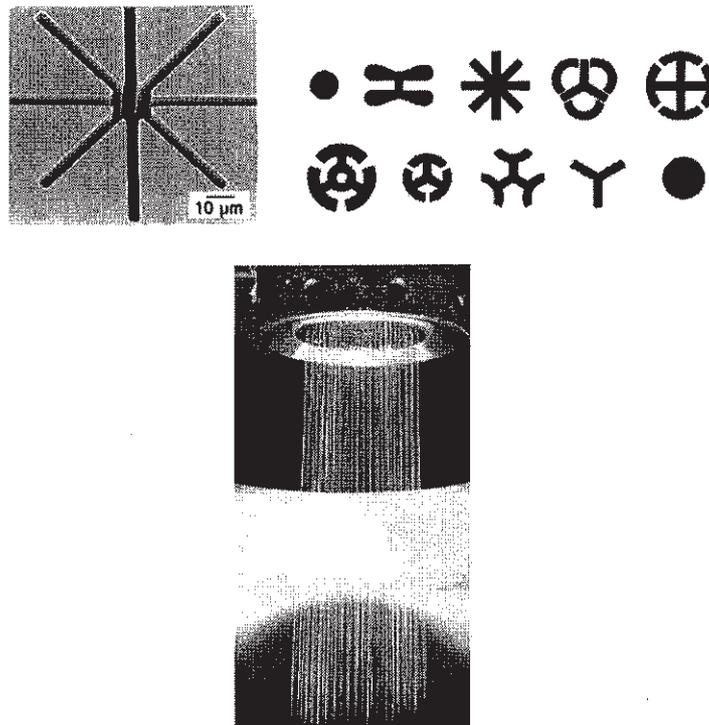


Figure 2-9 : Orifices de filage [IMM.00]

2.7. Le processus de micro usinage par « soft lithographie » :

Cette est une méthode alternative à la méthode de micro usinage LIGA, elle consiste également à fabriquer un moule puis à répliquer ce moule en coulant du PDMS. L'utilisation d'une matière photosensible SU-8 pour réaliser les reliefs du moule rend cette méthode moins coûteuse et plus rapide que la méthode LIGA.

Cette méthode est souvent utilisée pour la fabrication des prototypes de système micro fluïdique.

L'utilisation d'un élastomère pour la réplification du moule permet un modelage rapide et facilite la séparation entre la structure modelée et le moule en diminuant le risque d'endommager le moule.

Cependant, la structure PDMS se rétrécit après la cuisson environ 1%. Il peut être gonflé par des solvants non organiques comme le toluène et l'hexane [EFF.95]. L'élasticité de l'élastomère rend impossible la réalisation des reliefs avec un grand rapport de dimensions (Figure 2-10). Quand le rapport de dimensions est très élevé $h \gg d$ la structure PDMS sera déformée. Dans le cas inverse, si $d \ll h$ la structure ne peut pas résister à la force de compression entre le PDMS et le substrat de base [XIA.98].

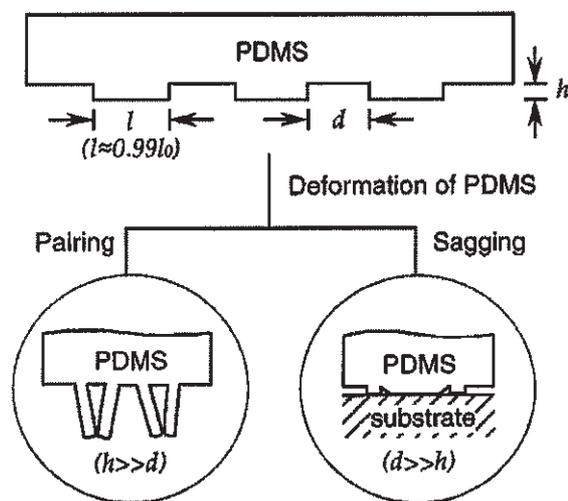


Figure 2-10 : Déformation de PDMS après le moulage [XIA.98]

Delamarche et al. ont montré que pour avoir un bon résultat, il faut que le rapport de dimensions des reliefs soit compris entre 0,2 et 2 [WOO.95].

L'utilisation de rayons ultra violets pour imprimer la structure sur la couche de SU-8 limite la taille minimale des reliefs obtenus par cette méthode.

Les différentes étapes du processus « soft lithographie » :

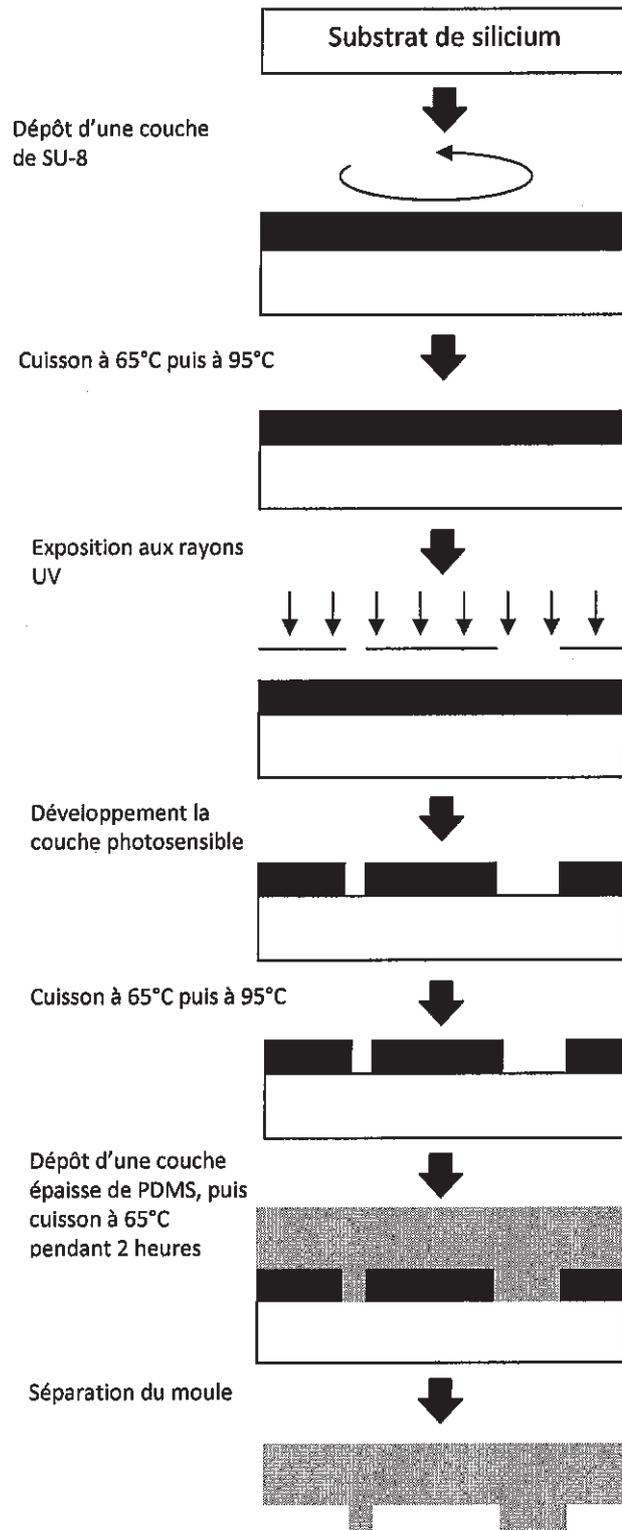


Figure 2-11 : Principe de la méthode de micro fabrication « soft lithographie »

Produit	Épaisseur [μm]	Vitesse de rotation du « spin coater » [rpm]	Contact	Temps de cuisson à 65°C T ₁ [min]	Temps de cuisson à 95°C T ₂ [min]	Énergie d'exposition [mJ/cm ²]	Temps de l'exposition [secondes]	Temps de cuisson à 65°C T ₃ [min]	Temps de cuisson à 95°C T ₄ [min]
SU-8 2007	7	3000	6,39	1	2	120	15	1	2
	8,5	2000	6,40	1	2	130	16	1	2
	10	1400	6,41	1	2	140	17	1	2
	12,5	1000	6,42	1	2	145	18	1	2
	15	3000	6,44	1	2	150	19	1	2
SU-8 2015	18	2500	6,46	1	2,5	170	21	1	2
	20	2200	6,47	1	3	185	23	1	2
	21	2000	6,48	1	3	190	24	1	2
	25	1750	6,50	1	3	215	27	1	2
	30	1500	6,53	1,5	4	250	31	1	3
SU-8 2025	38	1000	6,58	2	5	300	37	1	3
	25	3000	6,50	1	3	215	27	1	3
	30	2800	6,53	1	3	250	31	1	3
	34	2500	6,55	1,5	4	275	34	1	3
	40	2100	6,59	2	5	310	39	1	3
SU-8 2075	41	2000	6,60	2	5	315	39	1	3
	50	1700	6,65	2,5	7	375	47	1	4
	75	1000	6,80	3	9	475	59	1	7
	75	3000	6,80	3	9	475	59	1	7
	110	2000	7,01	5	20	575	72	1	10
225	1000	7,70	5	45	650	81	1	15	

Tableau 2-1 : Paramètres de fabrication du moule selon l'épaisseur désirée

1. La préparation du moule :

La structure est dessinée à l'aide d'un logiciel de dessin CAO. Une imprimante de grande précision permet d'imprimer le dessin et réaliser le masque [SHU.07].

Une couche de SU-8 est coulée sur un substrat de silicium à l'aide du « spin coater ». Le substrat de silicium est chauffé par la suite à une température de 65°C pendant un temps T1 puis à une température de 95°C pendant un temps T2.

Un rayonnement ultra violet passant au travers du masque permet d'imprimer le dessin sur la couche de SU-8. Le substrat de silicium est chauffé une deuxième fois à une température de 65°C pendant un temps T3 puis à une température de 95°C pendant un temps T4.

La vitesse de rotation de « spin coater », le contact, le temps et l'énergie d'exposition aux rayons ultra violet, et les différents temps d'échauffement T1, T2, T3, T4 sont donnés par le tableau 2-1 et ils permettent de contrôler l'épaisseur de la structure réalisée.

Le substrat est développé par la suite afin d'éliminer la couche de SU-8 qu'elle n'était pas exposée aux rayons X. La structure de SU-8 est réalisée sur le substrat de silicium.

2. Le modelage de PDMS :

Un mélange de PDMS et de catalyseur (10% catalyseur) est coulé sur la moule. Une procédure de dégazage permet d'éliminer les bulles d'air dans le PDMS. Le mélange est cuit à une température de 65°C pendant minimum deux heures. La couche de PDMS est séparée du moule et une structure de PDMS gravée par des micro reliefs est obtenue.

3. Le processus de collage plasma :

Afin d'obtenir une structure fermée pour réaliser des micros canaux, la couche de PDMS gravée est collée sur une lame de verre ou sur une couche lisse de PDMS. La couche lisse de PDMS est réalisée en coulant du PDMS sur un substrat vierge de silicium.

La surface à coller doit être nettoyée par soufflage d'azote comprimée et à l'aide de film adhésif.

Une fois les deux parties à coller sorties de l'appareil à plasma, les deux faces sont bloquées l'une contre l'autre puis l'ensemble est mis dans le four à 65°C pendant 10 minutes. La « cuisson » permet de terminer le processus de collage.

Cette méthode de micro usinage est utilisée souvent pour réaliser des systèmes micro fluidique : Micro valve [NAM.01], micro valve d'un système d'analyse d'A.D.N. [VAN.05], « lab-on-chip » pour l'analyse d'A.D.N. [CHO.99], micro pompe [MCD.04], Unité de culture des cellules [LEC.03], micro orifice [STE.05], micro fluidique système [BLA.07].

Conclusion :

La première partie de ce chapitre nous montre que le changement d'échelle implique une prépondérance de l'action des forces électrostatiques et les forces d'interactions plutôt que des forces de gravité dans le cas d'échelles importantes.

Dans les mécanismes que nous devons concevoir et réaliser pour manipuler des filaments de faibles diamètres, il faut être attentif que ces forces qui ne sont pas prises en compte dans les machines classiques ne viennent pas perturber d'une part les actionneurs qui seront à mettre en œuvre et d'autre part perturber les mouvements des fils à déplacer.

Par ailleurs, ce changement d'échelle nous conduit à abandonner les mécanismes d'usinage classiques qui ne sont pas adaptés à la fabrication de dispositifs susceptibles de manipuler des filaments de très petits diamètres. Il nous est donc nécessaire d'envisager d'autres techniques telles que celles de micro usinage qui sont habituellement utilisées dans les techniques de l'électronique. Des techniques examinées, il semblerait que la technique de lithographie douce « soft lithography » soit la mieux adaptée pour la fabrication d'objets prototypes avec une bonne précision à un coût acceptable. Devant manipuler un grand nombre de fils, ce qui implique de fabriquer « en série » un grand nombre de module actionneur de foule, nous envisagerons donc d'utiliser en premier lieu cette technique pour la faisabilité de notre « micro machine ».

3. Conception, réalisation et résultats

3.1. La tension de fils de chaîne :

Le procédé de tissage fait subir aux fils de chaîne de nombreuses contraintes en tension et des frottements contre les différents organes du métier à tisser. Ces organes provoquent l'usure des fils tout au long de leur traversée [GUE.05]. La sollicitation répétée des fils de chaîne en traction et en flexion peut causer la rupture des fils par fatigue. Cette sollicitation est due à l'allongement des fils de chaîne lors de l'ouverture de la foule, à l'allongement des fils de chaîne lors de la frappe du peigne et à la tension de base donnée par le régulateur de tension. La figure 3-1 montre l'évolution de la tension des fils de chaîne sur deux cycles du tissage. Les pics A, D, G correspondent à la frappe du peigne. Les pics B, E correspondent au moment où la foule est totalement ouverte. Les creux C, F correspondent au moment de la fermeture de la foule, la tension à ce moment est égale à la tension de base.

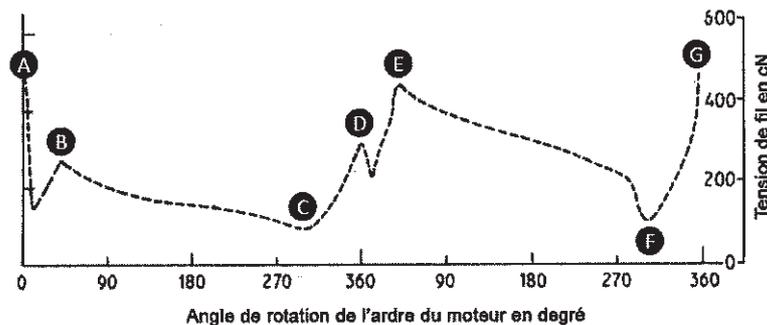


Figure 3-1 : L'évolution de la tension de fils de chaîne en fonction de l'angle de rotation de l'arbre du moteur de la machine à tisser [LOR.82]

La tension est nécessaire pour :

- frapper la duite contre le tissu,
- séparer les fils lors de l'ouverture de la foule,
- maintenir les lamelles du casse-chaîne,
- maintenir les fils de chaîne dans un plan constant (plan du tissage),
- faire tourner l'ensouple.

L'excès de tension des fils modifie l'aspect du tissu et augmente le taux de casses en chaîne au cours du tissage. Ceci provoque une altération de la qualité de l'étoffe obtenue et diminue l'efficacité du tissage.

3.1.1. La tension de base :

Pour calculer la tension de base T_0 suffisante pour avoir une flèche maximale égale à h_0 , on va considérer que le fil de chaîne d'une masse linéique t est suspendu par ses extrémités entre le porte-fil et le rouleau poitrinière sur une distance L . Ce fil supporte son propre poids (Figure 3-2).

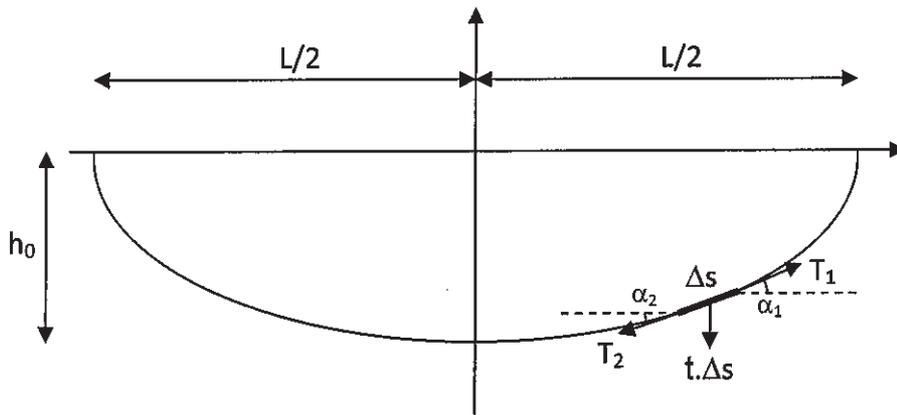


Figure 3-2 : Le schéma du fil tendu

Considérant un petit morceau du fil d'une longueur Δs , en écrivant l'équilibre mécanique du fil, on a :

$$T_2 \times \cos \alpha_2 - T_1 \times \cos \alpha_1 = 0 \quad \text{Équation 3-1}$$

$$T_2 \times \sin \alpha_2 - T_1 \times \sin \alpha_1 - \Delta s \times t \times g = 0 \quad \text{Équation 3-2}$$

On pose :

$$T_2 \times \cos \alpha_2 = T_1 \times \cos \alpha_1 = T_0 \quad \text{Équation 3-3}$$

En divisant l'équation (2-2) par T_0 on a :

$$\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1 = \frac{\Delta s \times t \times g}{T_0} \quad \text{Équation 3-4}$$

En passant à une échelle plus petite :

$$\frac{d}{dx} (\tan \alpha) = \frac{ds}{dx} \times \frac{t \times g}{T_0} \quad \text{Équation 3-5}$$

d'où : $\tan \alpha = \frac{dy}{dx}$; $ds = \sqrt{dy^2 + dx^2}$

ce qui entraîne :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{t \times g}{T_0} \times \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad \text{Équation 3-6}$$

La solution de cette équation différentielle donne l'équation de la courbe de fil

$$y = \frac{T_0}{2t \times g} \left(k_1 e^{\frac{t \times g \times x}{T_0}} + \frac{1}{k_1} e^{-\frac{t \times g \times x}{T_0}} \right) + k_2 \quad \text{Équation 3-7}$$

Avec $k_1, k_2 \in \mathbf{R}$

Pour trouver les constantes k_1, k_2 , on utilise les conditions aux limites

$$\text{Comme } \begin{cases} y\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \\ y\left(-\frac{L}{2}\right) = 0 \end{cases}$$

$$\text{Alors } \begin{cases} K_1 = 1 \\ k_2 = -\frac{T_0}{2t \times g} \left(e^{\frac{t \times g \times L}{2T_0}} + e^{-\frac{t \times g \times L}{2T_0}} \right) \end{cases} \quad \text{Équation 3-8}$$

Ainsi la solution de l'équation est donnée par :

$$y = \frac{T_0}{2t \times g} \left[\left(e^{\frac{t \times g \times x}{T_0}} + e^{-\frac{t \times g \times x}{T_0}} \right) - \left(e^{\frac{t \times g \times L}{2T_0}} + e^{-\frac{t \times g \times L}{2T_0}} \right) \right] \quad \text{Équation 3-9}$$

Dans le cas où la flèche maximale h_0 est beaucoup plus petite que la longueur du fil L , on peut écrire :

$$h_0 = \frac{t \times g \times L^2}{8T_0} \quad \text{Équation 3-10}$$

et la tension de fil aux extrémités :

$$T_0 = \frac{t \times g \times L^2}{8h_0} \quad \text{Équation 3-11}$$

3.1.2. La tension due à l'ouverture de la foule :

Cette tension est due à l'allongement des fils de chaîne lors de l'ouverture de la foule. Dans le cas où les fils de chaîne sont des filaments en cuivre, on peut calculer cette tension par l'équation suivante :

$$T_f = E \times S \times \varepsilon \quad \text{Équation 3-12}$$

Avec :

E est le module de Young du filament de cuivre

S est la section du filament

ε est la déformation des filaments lors de l'ouverture de la foule

Cette équation reste applicable quand la déformation du filament du cuivre ne dépasse pas la limite d'élasticité.

La figure 3-3 représente la géométrie de la foule. Au repos, foule fermée, les fils de chaîne (filament en cuivre) sont dans la position ACB. Lors de la séparation des fils pour introduire la trame, foule ouverte, les fils de chaîne sont dans la position AC'B.

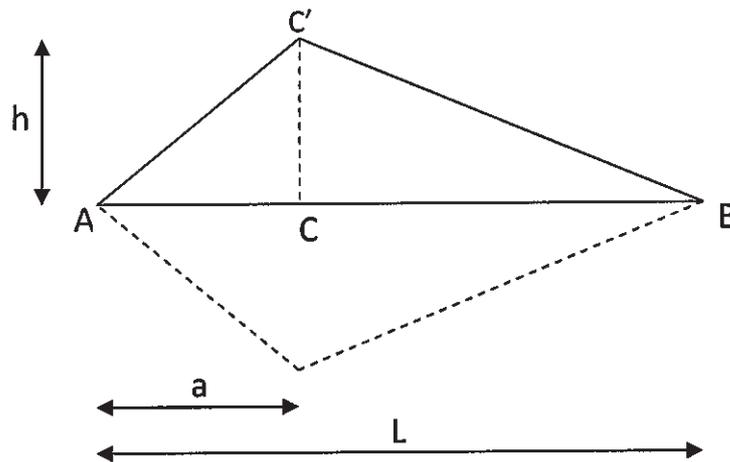


Figure 3-3 : Schéma de la foule

L'allongement ΔL dû au mouvement d'ouverture de la foule est défini par l'équation suivante :

$$\Delta L = \overline{AC'} + \overline{BC'} - \overline{AB} = \sqrt{a^2 + h^2} + \sqrt{(L-a)^2 + h^2} - L \quad \text{Équation 3-13}$$

Où :

h est la demie hauteur de la foule

L est la distance entre le porte-fils et la façade du tissu

a est la distance entre la lame et la façade du tissu

On peut écrire également l'allongement des fils avec l'équation suivante :

$$\Delta L = a \times \sqrt{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2} + (L-a) \times \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L-a}\right)^2} - L \quad \text{Équation 3-14}$$

Dans le cas où la demie hauteur de la foule h est beaucoup plus petite que la distance $(L-a)$ et de la distance a , on peut écrire :

$$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2} \approx 1 + \frac{h^2}{2a^2} ; \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L-a}\right)^2} \approx 1 + \frac{h^2}{2(L-a)^2} \quad \text{Équation 3-15}$$

et par la suite

$$\Delta L = a \times \left(1 + \frac{h^2}{2a^2}\right) + (L-a) \times \left(1 + \frac{h^2}{2(L-a)^2}\right) - L \quad \text{Équation 3-16}$$

$$\Delta L = \frac{h^2}{2} \times \frac{L}{a \times (L-a)} \quad \text{Équation 3-17}$$

ce qui entraîne

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{h^2}{2} \times \frac{1}{a \times (L-a)} \quad \text{Équation 3-18}$$

et la tension du fil due à l'ouverture de la foule

$$T_f = E \times S \times \frac{h^2}{2} \times \frac{1}{a \times (L-a)} \quad \text{Équation 3-19}$$

La tension du filament en foule ouverte est égale à la somme de la tension de base et la tension due à l'ouverture de la foule :

$$T = T_0 + T_f \quad \text{Équation 3-20}$$

à partir des équations (3-11) et (3-19) on peut écrire :

$$T = \frac{t \times g \times L^2}{8h_0} + E \times S \times \frac{h^2}{2} \times \frac{1}{a \times (L-a)} \quad \text{Équation 3-21}$$

$$\text{Or } \begin{cases} t = \rho \times S \\ S = \frac{\pi}{4} D^2 \end{cases} ; \rho \text{ est la densité du filament, } D \text{ est le diamètre du filament}$$

et la tension totale du fil lors de l'ouverture de la foule

$$T = \frac{\pi \rho \times g}{8} \times \frac{D^2 \times L^2}{h_0} + \frac{\pi E}{8} \times \frac{D^2 \times h^2}{a \times (L-a)} \quad \text{Équation 3-22}$$

Avec :

ρ est la densité du filament,

E est le module de Young du filament,

D est le diamètre du filament,

h_0 est la déflexion maximale du filament en foule fermée,

h est la demie hauteur de la foule ouverte,

a est la longueur de foule avant,

L est la longueur totale de la foule.

La contrainte du filament due à sa tension en foule ouverte doit être inférieure de la limite élastique σ_y du filament et la limite d'endurance σ_D .

3.1.3. Le comportement mécanique du filament de cuivre :

Les propriétés mécaniques des filaments de cuivre nous permettent de vérifier si ce filament est tissable ou non, autrement dit, si ce filament peut résister aux contraintes imposées par le procédé du tissage.

L'étude des comportements mécaniques des filaments peut être suivie par deux grands modes de déformation :

- déformation en mode statique comme la traction, compression...
- déformation en mode dynamique comme la fatigue ou DMA (Analyse Dynamique Mécanique).

Le comportement mécanique du filament a été déterminé par traction simple. La mesure des propriétés en mode dynamique par des essais de fatigue. Le diamètre du filament étudié est de 25 μm avec une pureté de 99,99% [GOO.09]. Il est conditionné dans une bobine de 100 m de long et fabriqué par la société *Goodfellow* [GOO.09].

3.1.3.1. La machine de mesure « UFT » :

L'UFT « *Universal Fiber Tester* » a été développée par Bunsell et ses collaborateurs au début des années 70 [BUN.71], Le schéma de principe est représenté sur la figure suivante :

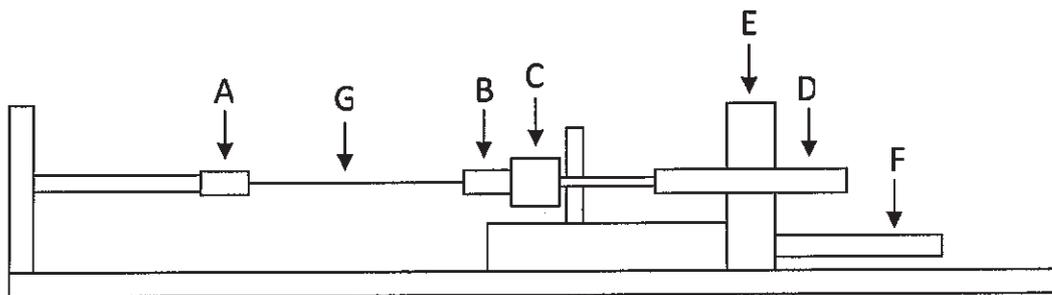


Figure 3-4 : Machine « UFT »

L'éprouvette (G) est pincée entre deux mors (A) et (B). Le capteur piézoélectrique (C), relié au mors (B), permet de fournir un signal directement proportionnel à la charge subie par l'éprouvette. Ce capteur est solidaire d'un chariot (E) dont le mouvement est assuré par une vis couplée à un moteur (F) asservi par le signal de la charge. Le déplacement du chariot est

mesuré grâce à une jauge de déformation (D). La machine est commandée par une unité centrale et reliée à un ordinateur équipé par le logiciel WinATS.

L'unité centrale permet de régler la vitesse de déformation la charge et la déformation maximale et la charge ou la déformation à appliquer.

Le logiciel WinATS permet l'enregistrement et le traitement des données. Les paramètres tels que le module de Young, la limite élastique, la contrainte et la déformation à la rupture peuvent être déterminés.

La machine « UFT » permet de réaliser plusieurs types de tests mécaniques :

- Traction simple, par déplacement du chariot à vitesse constante pouvant aller de 1 à 30 mm/min.
- Fluage, en imposant une charge de consigne. Le moteur corrige les charges détectées par le capteur piézoélectrique. La variation de la déformation en fonction du temps est alors enregistrée.
- Relaxation, en enregistrant les variations de la charge en fonction du temps après avoir imposé une déformation de consigne.
- Fatigue, le mors A sera relié à un pot vibrant qui fournit une sollicitation sinusoïdale à une fréquence de 50 Hz. Une charge est imposée. Cette charge reste constante tout au long de l'essai malgré l'élongation de l'échantillon. La sensibilité de l'asservissement est de 0,1 cN.

3.1.3.2. Comportement longitudinal en mode statique : traction simple

Cette technique est une méthode simple qui permet d'évaluer la résistance mécanique du matériau solide considéré. Elle consiste à soumettre un échantillon cylindrique, de section régulière, à une déformation unidirectionnelle à vitesse constante et cela généralement jusqu'à la rupture de l'échantillon. On enregistre ensuite la charge en fonction de la déformation. Les données « charge-déformation » nous permettent de calculer le module de Young, la limite élastique, la contrainte et la déformation à la rupture.

Test et résultats :

Les essais de traction simple ont été réalisés sur la machine « UFT » avec un capteur de 1 N. Les essais de traction simple sur filament obéissent à une norme qui stipule que le temps de rupture doit être de l'ordre de $20 \text{ s} \pm 3 \text{ s}$ [norme NF-G07-003]. La longueur de notre éprouvette est de 50 mm. Il est important de recouvrir la surface de contact entre les mors

de la machine de traction et le filament avec du papier adhésif pour limiter le cisaillement du filament et éviter la rupture au niveau des pinces (Figure 3-5).

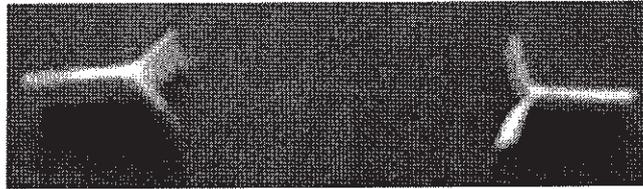


Figure 3-5 : L'éprouvette recouverte du papier adhésif à ses deux extrémités

Les essais de traction ont été répétés 10 fois. La figure 3-6 montre la courbe de contrainte – déformation pour un filament de cuivre de 25 μm de diamètre. Le module de Young est de 120 GPa, la limite élastique est de 170 MPa, la contrainte et la déformation à la rupture sont de 310 MPa, et 27% respectivement.

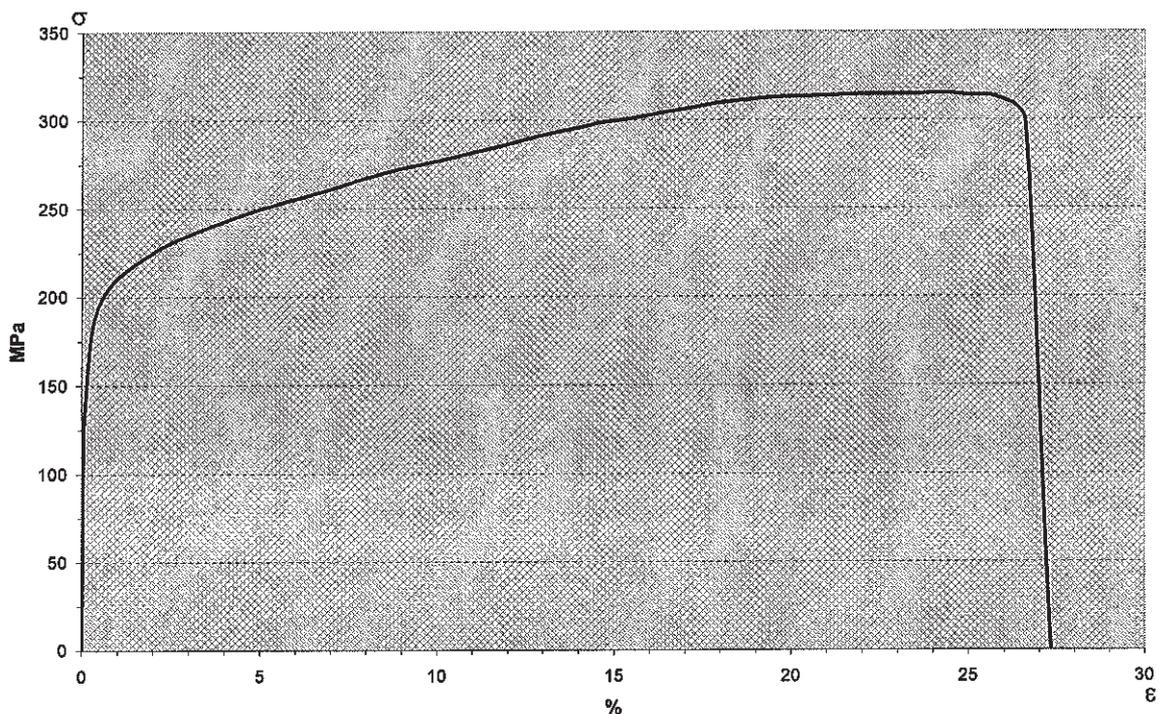


Figure 3-6 : Courbe contrainte-déformation du filament de cuivre

En comparant les résultats obtenus avec les données du tableau 3-1 qui représente les propriétés du cuivre, on constate une légère amélioration du comportement mécanique du filament de cuivre qui est due aux conditions de fabrication, au traitement appliqué et au faible diamètre du filament. En effet, la possibilité de trouver des points fragiles dans un matériau diminue avec la diminution des dimensions de l'éprouvette « loi de Weibull ». Toutefois, la valeur de l'exposant de Weibull qui caractérise l'étendue de la distribution est

élevée pour les métaux (de l'ordre de 20 pour l'acier) correspond une distribution resserrée. Donc l'effet de dimension est faible sur le comportement des métaux [DOM.04].

Etat	Symbol AFNOR	Contrainte de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2% (MPa)	Déformation (A%)	Module de Young (GPa)	Limite de fatigue pour 10^8 Cycle (MPa)
Recuit	O	230	60	45	120	60 - 75
¼ dur	H11	260	190	25	-	-
½ dur	H12	300	250	14	-	90 - 100
4/4 dur	H14	350	320	6	125	100 - 130
Ressort	H15	390	360	4	-	-
Super ressort	H18	460	440	2	-	-
Moulé	-	150	40	25	-	-

Tableau 3-1 : Les caractéristiques mécaniques du cuivre [CUI.00]

3.1.3.3. Comportement en mode dynamique : fatigue en traction cyclique

Lorsqu'on soumet un matériau à des cycles répétés d'efforts, il subit des modifications dans les microstructures et il peut rompre sous des sollicitations inférieures à la contrainte à la rupture (obtenue par un essai de traction) ou bien souvent inférieure à la limite élastique [LEC.06]. Le test de fatigue est une méthode simple qui permet :

- d'évaluer la durée de vie d'un matériau solide considéré subit une contrainte cyclique. La durée de vie est définie par le nombre de cycles nécessaires pour entraîner la rupture de l'éprouvette,
- de calculer la limite d'endurance σ_D . Pour un tel matériau soumis à une contrainte cyclique de valeur inférieure à σ_D , la rupture en fatigue ne se produit en principe pas.

L'essai de fatigue consiste à soumettre un échantillon cylindrique, de section régulière, à une sollicitation répétée. Généralement les sollicitations sont appliquées d'une façon sinusoïdale en fonction du temps (Figure 3-7). On mesure ensuite le nombre de cycles requis pour entraîner la rupture de l'éprouvette. On répète plusieurs fois l'essai, à différentes amplitudes

de contraintes, puis on trace la courbe de Wöhler qui représente l'évolution de la durée de vie en fonction de la valeur de la contrainte maximale σ_{max} .

Plusieurs types d'essais de fatigues peuvent être distingués selon le type de sollicitation à savoir :

- fatigue en traction-compression,
- fatigue en torsions alternées,
- fatigue en flexion.

Essais et résultats :

La machine « UFT » a été utilisée également pour réaliser des essais de fatigue en traction.

La sollicitation appliquée est une contrainte de traction répétée d'une façon sinusoïdale.

$$F(t) = \frac{F_{max}}{2} (\sin(\omega t) + 1)$$

Équation 3-23

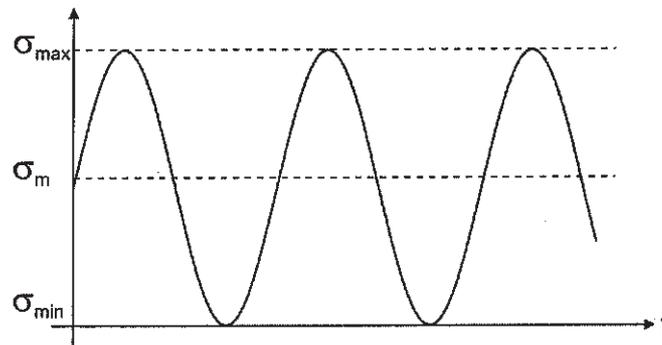


Figure 3-7 : Contraintes répétées

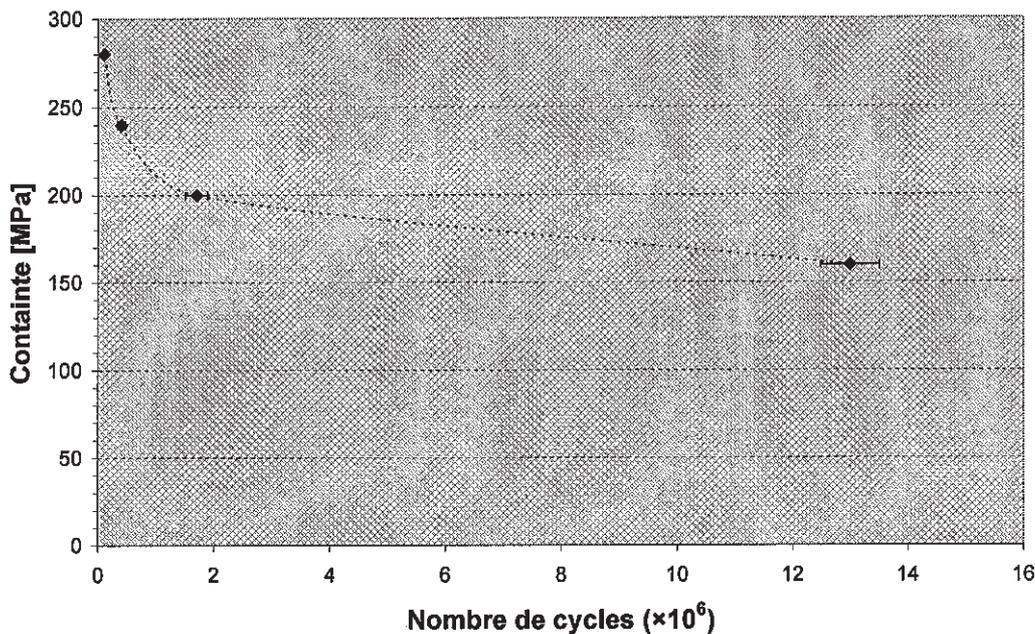


Figure 3-8 : L'évolution de nombre de cycles en fonction de la contrainte maximale

La longueur de l'éprouvette est de 50 mm. Ici également il faut recouvrir la surface de contact entre les mors de la machine et le filament avec du papier adhésif pour limiter le cisaillement du filament et éviter la rupture au niveau des pinces.

Les essais de fatigue ont été répétés 10 fois pour chaque amplitude de contrainte maximale σ_{max} . La figure 3-8 montre la durée de vie en fonction de la contrainte maximale. On peut constater que le nombre de cycle jusqu'à la rupture augmente rapidement quand la contrainte maximale devient inférieure à la limite élastique.

La figure 3-9 montre le facies de rupture pour un échantillon soumis à une sollicitation d'une valeur légèrement inférieure à la contrainte à la rupture. On peut remarquer que le facies de rupture est un facies de rupture ductile dû à une déformation plastique.

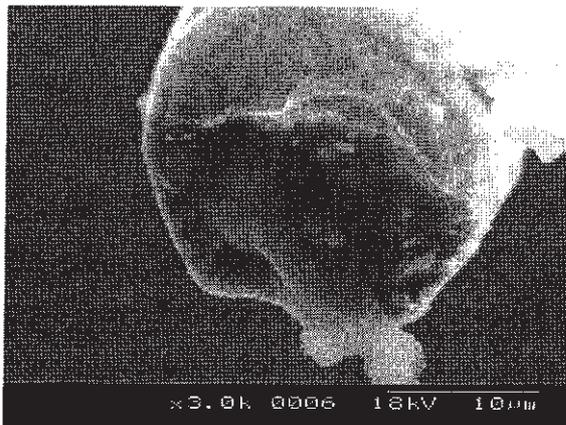


Figure 3-9 : Photo MEB du facies de rupture en fatigue avec $\sigma_{max}= 240$ MPa

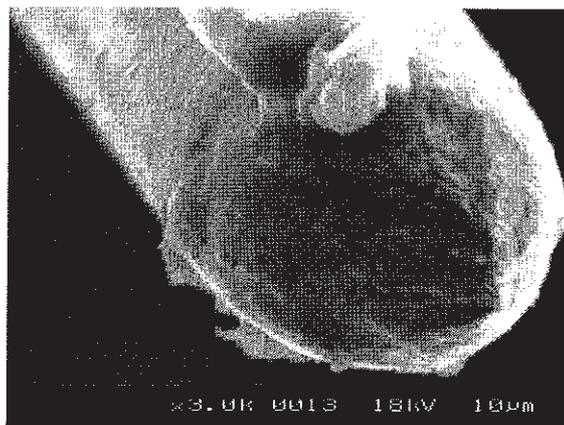


Figure 3-10 : Photo MEB du facies de rupture en fatigue avec $\sigma_{max}= 160$ MPa

Cependant, la figure 3-10 montre le facies de rupture pour un échantillon soumis à une sollicitation d'une valeur inférieure de la limite élastique. On peut constater deux zones. Une première zone d'un aspect lisse qui représente une zone de rupture en fatigue. Cette zone est formée par la progression de la fissuration dans la structure à chaque sollicitation. Une deuxième zone d'un aspect fibreux et tourmenté qui représente une zone de rupture finale à cause d'une déformation plastique importante.

Les résultats des tests de comportement mécanique montrent la capacité du filament de cuivre à supporter les efforts provoqués par le procédé du tissage. Ils nous permettent également d'avoir les paramètres nécessaires à la conception des différentes parties de la machine à tisser.

3.2. Le dérouleur de chaîne :

Deux systèmes ont été conçus :

- Alimentation par une ensouple
- Alimentations par un cantre de bobines

3.2.1. Alimentation par une ensouple :

La machine à tisser est alimenté par une nappe de fils de chaîne stockée sur une ensouple. Un régulateur négatif de la tension de chaîne permet de délivrer la chaîne sous une tension réglable (Figure 3-11). La corde entourée autour de l'axe de l'ensouple s'oppose à l'avancée de la chaîne en freinant l'ensouple. Le réglage de la tension s'effectue en déplaçant le poids sur le levier.

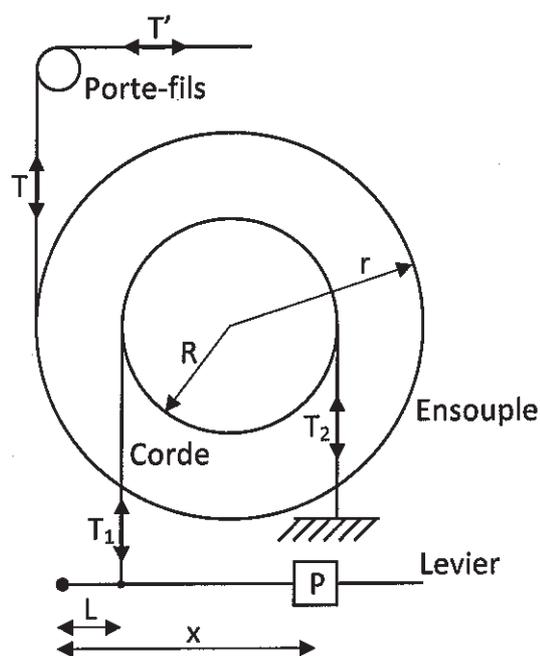


Figure 3-11 : Schéma du régulateur négatif

Pour calculer la tension du fil, on a :

$$T_1 = P \times \frac{x}{L}$$

Équation 3-24

À l'équilibre :

$$(T_1 - T_2) \times R = T \times r$$

Équation 3-25

Avec :

R est le rayon de l'axe de l'ensouple

r est le rayon de la nappe de fils stockée sur l'ensouple

Or

$$T_1 = T_2 \times e^{f\alpha} \quad \text{Équation 3-26}$$

Avec :

f est le coefficient de frottement entre la corde et l'axe de l'ensouple de rayon r ,

α est l'angle de contact de frottement.

Donc la tension des filaments à l'entrée de la machine à tisser est égale à :

$$T = \frac{R}{r} \times \frac{x}{L} \times (1 - e^{-f\alpha}) \quad \text{Équation 3-27}$$

Lorsque le rayon r de la nappe de fils stockée sur l'ensouple diminue en cours de tissage, la tension T diminue. Ce qui limite l'utilisation de ce type de régulateur dans le domaine industriel. Cependant, dans notre cas, l'épaisseur de la nappe de fils de chaîne sera faible par rapport au diamètre de l'ensouple, donc la variation du rayon r sera quasi nulle. De ce fait, la variation de la tension au cours de tissage sera très faible.

Dans le cas d'un porte-fils tournant, on peut négliger le frottement entre les filaments et le porte-fils. On peut écrire :

$$T = T' \quad \text{Équation 3-28}$$

Dans le cas d'un porte-fils fixe, la tension des filaments est :

$$T' = T \times e^{f'\beta} \quad \text{Équation 3-29}$$

Avec :

f' est la coefficient de frottement entre le filament et le porte-fils,

β est l'angle de contact de frottement.

L'ourdissage de la nappe de fils de chaîne peut s'effectuer à partir d'une bobine de filaments de 100 m de long (Figure 3-12). Une seule couche de filaments sera enroulée sur un tambour de grand diamètre. Le tendeur à coupelles (la tension donnée par le poids de coupelles) permet de donner une tension contrôlée au filament et le mouvement du dispositif de guidage pendant l'enroulement permet de séparer les filaments avec un pas déterminé. Ensuite, la couche de filaments sera coupée transversalement et enroulée sur une ensouple.

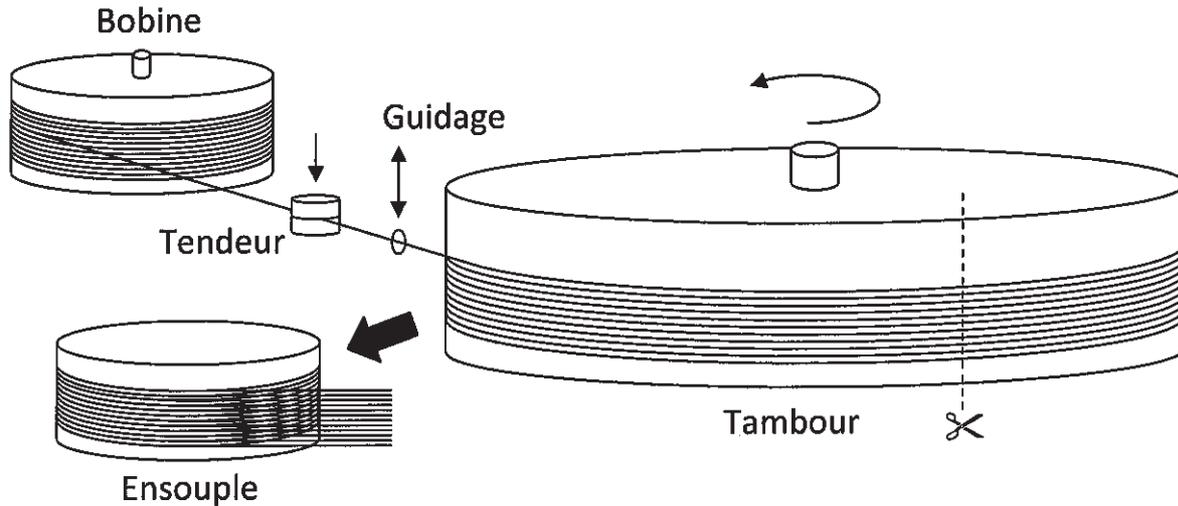


Figure 3-12 : Schéma de la préparation de la nappe de fils de chaîne

3.2.2. Alimentations par un cantre de bobines :

La machine à tisser sera alimentée directement par un cantre de bobines. La figure 3-14 montre le schéma de ce système. La tension des filaments devant être constante et homogène pour tous les filaments de la nappe, chaque filament est passé dans un tendeur à coupelles et par la suite entre deux rouleaux puis dans une dent du peigne miseur. Ce dernier permet de donner la largeur voulue à la nappe en séparant les filaments par un pas régulier. La nappe est déviée à l'aide d'un cylindre.

La tension T à l'entrée de la machine à tisser résulte de la tension donnée par le tendeur, du poids P de la longueur de filament libre parcourant le cantre et par le frottement de ce filament avec les différents organes de maintien (peigne, cylindre de déviation, double rouleaux). La tension T peut donc être exprimée par la formule suivante :

$$T = T_T + T_P + T_f \quad \text{Équation 3-30}$$

Avec :

T_T est la tension donnée par le tendeur,

T_P est la tension due à la longueur libre du filament,

T_f est la tension due au frottement entre le filament et les différents organes.

Or, la longueur libre du filament étant fonction de la position de la bobine sur le cantre, il en résulte que T_P et T_f varient d'un filament à l'autre. On en conclut que pour avoir une même tension T , il faut donner des tensions T_T différentes selon la position de la bobine.

Le peigne miseur peut être une rangée des lentilles de diffraction de la lumière (Figure 3-13). Elles sont fabriquées en nickel par la société Electron Microscopy Sciences de référence « HD100H-Ni » [ELE.00].

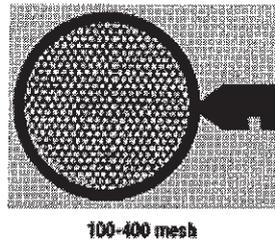
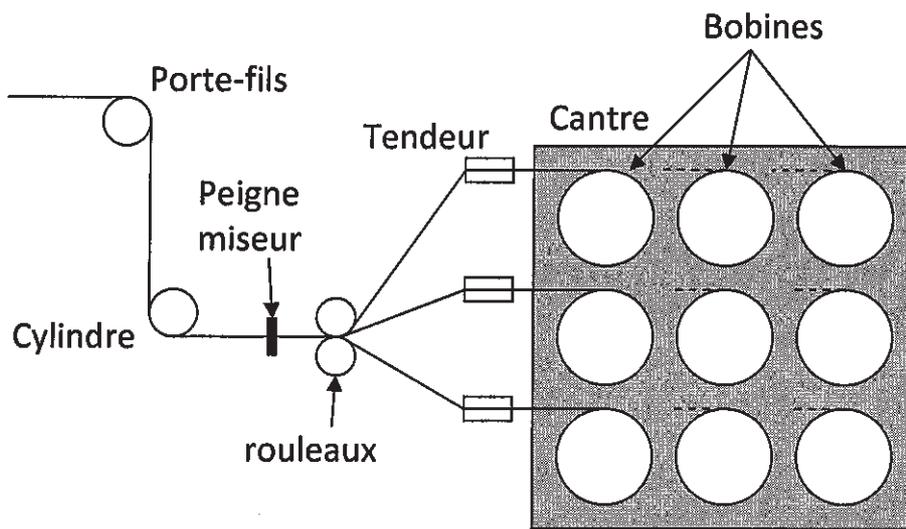
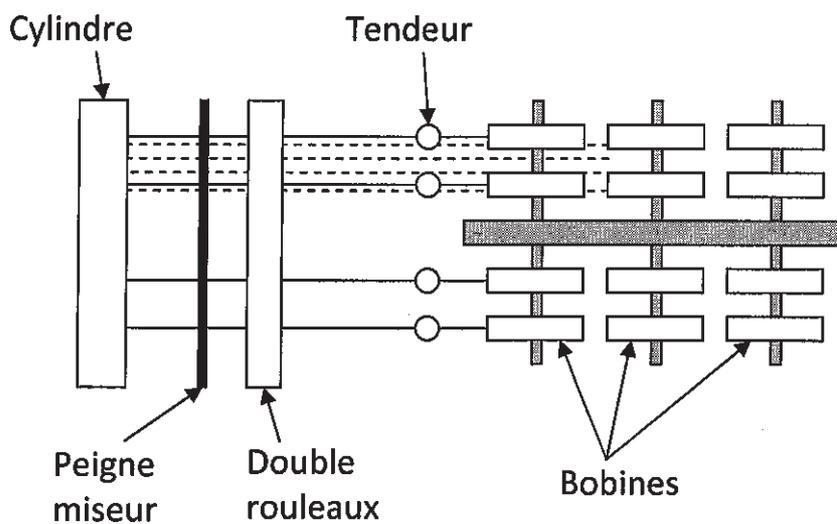


Figure 3-13 : Lentille avec une grille de trous hexagonaux



A – Vue de face



A – Vue de dessus

Figure 3-14 : Schéma du dispositif d'alimentation par un cantre de bobines

La réparation des casses chaîne sur ce système est plus simple que le système d'alimentation par une ensouple. Il permet également d'utiliser des filaments d'une matière ou diamètre différent ce qui présente un avantage très important pour la fabrication de tissu technique. Mais le réglage de la tension des filaments est plus difficile.

3.3. Le dispositif d'insertion de trame :

Deux systèmes ont été conçus :

- Système d'insertion à lance tubulaire,
- Système d'insertion à lance avec une pince positive.

3.3.1. Système d'insertion à lance tubulaire :

Le fil de trame (filament en cuivre) est stocké sur une bobine (Figure 3-19). Un moteur à courant continu équipé d'un réducteur de vitesse de référence « 918D-1024 » [SEL.00] et commandé par un régulateur de vitesse permet de dévider la bobine à une vitesse constante. Le filament est passé dans un œillet de guidage puis dans un frein à coupelles. Ce dernier joue un rôle de tendeur et pince à la fois. Le filament est passé par la suite dans un tube capillaire de 350 µm de diamètre extérieur et de 20 mm de long. Le tube capillaire est fabriqué par le laboratoire ISIS à Strasbourg par un étirage de tube de verre chauffé à une température élevée. Le tube capillaire est monté sur une glissière de précision de référence « LWL 12 C1 » [IKO.00] équipé d'un ressort de retour (Figure 3-15).



Figure 3-15 : Glissière miniature de précision

L'ensemble de disque à frein, l'œillet de guidage, et la glissière sont montés sur un actionneur pneumatique de précision à double effet (Figure 3-16) de référence « MPS-1M-1 » [CCM.00] ou un actionneur de précision à entraînement électromagnétique (Figure 3-17) de référence « NT 60-25/5A » [IKO.00]. Dans le cas d'utilisation d'un actionneur pneumatique, un distributeur de type « 2/3 » permet de commander l'actionneur. Dans le cas d'utilisation d'un actionneur à entraînement électromagnétique, une unité de référence « TDL1-1600 » [IKO.00] permet de piloter l'actionneur. Les deux types d'actionneurs permettent de déplacer le tube capillaire à une vitesse maximale de l'ordre de 1 m/s. Cette

vitesse peut être réglable. La précision de l'actionneur électrique est plus élevée que la vitesse de l'actionneur pneumatique (de l'ordre de $0,5 \mu\text{m}$) mais le coût est plus élevé aussi.

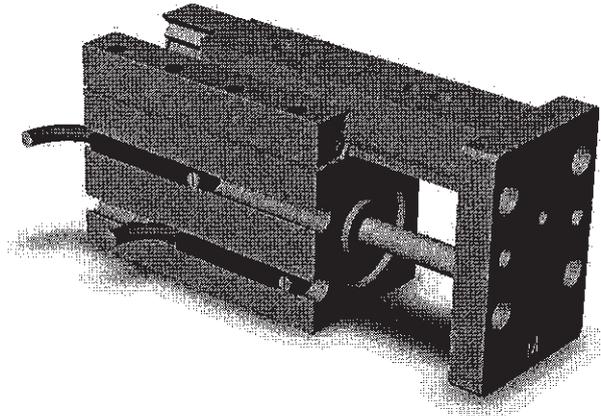


Figure 3-16 : Actionneur pneumatique

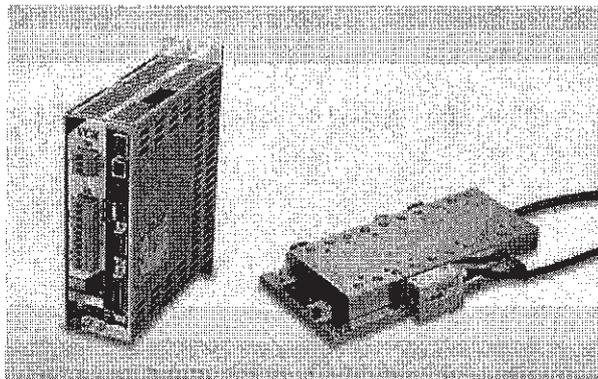


Figure 3-17 : Actionneur à entraînement électromagnétique avec son unité de pilotage

Une pince pneumatique (Figure 3-18) de référence « MDHR 2-10R-M9B1 » [SMC.00] à l'autre coté du système permet de tenir le filament de cuivre pendant la phase de sortie du tube capillaire. Les deux mors de la pince sont équipés d'une couche de papier de verre fine pour limiter le glissement du filament de cuivre et éviter sa rupture par cisaillement. Une pince à entraînement électromagnétique de référence « MPH » [SCH.00] peut être utilisable.

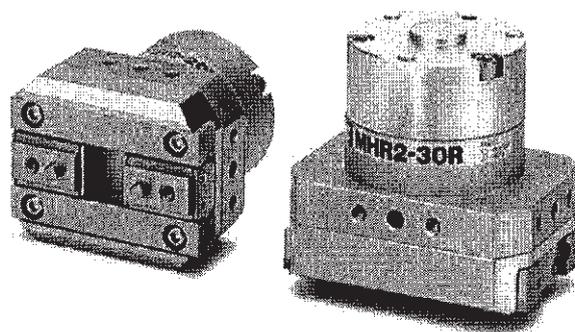


Figure 3-18 : Pince pneumatique

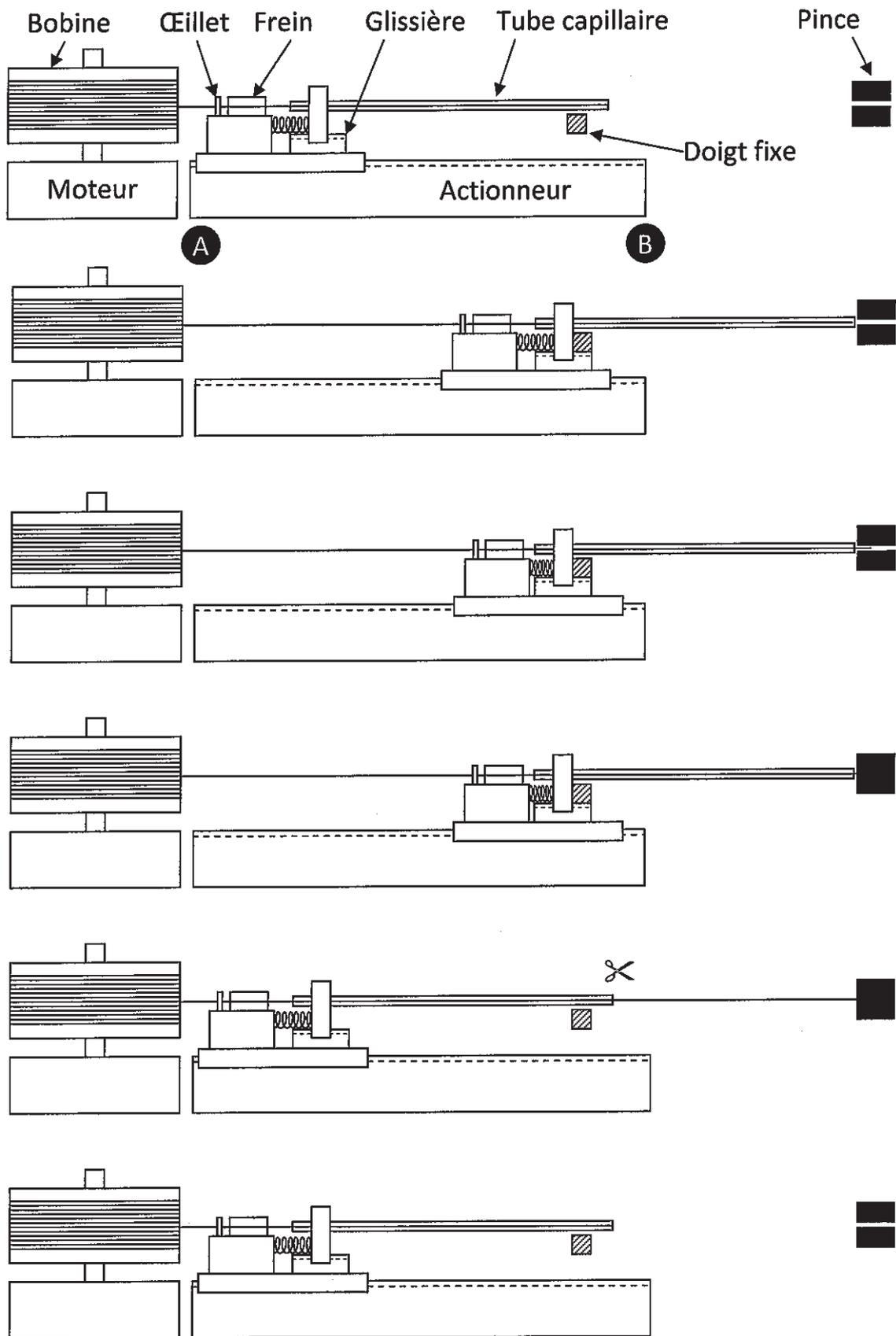


Figure 3-19 : Schéma du principe d'insertion à lance tubulaire

La fermeture de la pince est confirmée à l'aide d'un détecteur de serrage intégré.

Une lame commandée par un actionneur électromagnétique de référence « S-17-85 » [MAG.00] permet de couper le filament de cuivre.

La figure 3-19 montre la succession des opérations du principe d'insertion :

- Le tube capillaire est à l'extérieur de la foule, le filament est enfilé dans le tube et tenu par le frein.
- Le tube capillaire rentre dans la foule grâce au mouvement de l'actionneur. Le doigt fixe bloque seulement l'avancé du tube capillaire car il est monté sur une glissière.
- Le frein continue à avancer, son mouvement permet d'enfiler le filament dans le tube.
- Le détecteur de fin de course de l'actionneur coté B donne le signale pour fermer la pince. Le bout du filament est tenu par les mors de la pince.
- Le détecteur de serrage de la pince confirme la fermeture de la pince. L'actionneur recule et le détecteur de fin de couse coté A permet d'activer la lame coupante.
- La duite (le morceau du filament coupé) est déposée dans la foule et on revient à la position du départ.

3.3.2. Système d'insertion à lance avec une pince positive :

Ici également, le fil de trame (filament en cuivre) est stocké sur une bobine (Figure 3-21). Un moteur à courant continu équipé d'un réducteur de vitesse de référence « 918D-1024 » [SEL.00] et commandé par un régulateur de vitesse permet de dévider la bobine à une vitesse constante. Le filament est passé dans un présentateur (œillet) et tenu par une pince pneumatique de référence « MDHR 2-10R-M9B1 » [SMC.00]. Les deux mors de la pince sont équipés d'une couche de papier de verre fine. L'un de deux mors est équipé d'une lame coupante. La fermeture de la pince est confirmée à l'aide d'un détecteur de serrage intégré.

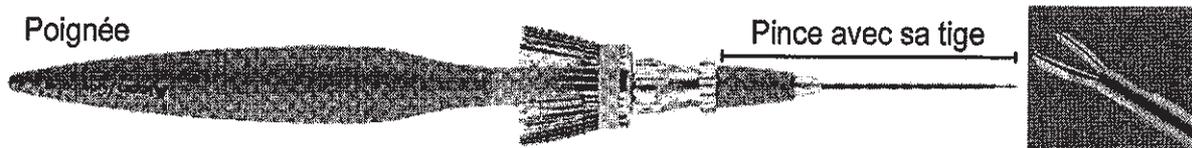


Figure 3-20 : Pince de micro chirurgie montée sur une poignée [ALC.00]

Dans l'autre coté du système, une pince mobile de référence « 712.41.42 » [ALC.00]. Il s'agit d'une pince de micro chirurgie de 800 μm de diamètre et capable de tenir le filament de très faible diamètre (Figure 3-20). Une pince de micro chirurgie de 900 μm de diamètre de

référence « G-36256 » [GEU.00] peut également être utilisable. Ce type de pince est actionnée positivement à l'aide d'un poussoir. Un actionneur électromagnétique de référence « S-17-85 » [MAG.00] peut ouvrir et fermer la pince.

De même que le premier système, le mouvement de la pince mobile est assuré par un actionneur pneumatique de précision à double effet de référence « MPS-1M-1 » [CCM.00] ou un actionneur de précision à entraînement électromagnétique de référence « NT 60-25/5A » [IKO.00]. Dans le cas d'utilisation d'un actionneur pneumatique, un distributeur de type « 2/3 » permet de commander l'actionneur. Dans le cas d'utilisation d'un actionneur à entraînement électromagnétique, une unité de référence « TDL1-1600 » [IKO.00] permet de piloter l'actionneur.

Le mouvement de l'actionneur permet de changer la position du présentateur à l'aide d'un levier.

La figure 3-21 montre la succession des opérations du principe d'insertion :

- La pince mobile est à l'extérieur de la foule, le filament est tenu par la pince fixe et le présentateur est en position haute.
- La pince mobile rentre dans la foule, le présentateur descend en position basse.
- Le détecteur de fin de course de l'actionneur coté A donne le signal pour fermer la pince mobile et ouvrir la pince fixe, ce qui permet de transférer le filament de la pince fixe à la pince mobile.
- Après le transfert du filament, la pince mobile sort de la foule. Le présentateur monte en position haute. Ce qui permet de positionner le filament entre les mors de la pince fixe.
- Le détecteur de fin de course de l'actionneur coté B permet d'activer la pince fixe. La fermeture de la pince fixe permet de tenir puis couper le filament.
- Le détecteur de serrage de la pince fixe confirme la fermeture de la pince fixe. La pince mobile s'ouvre et on revient à la position initiale.

Le système d'insertion à lance avec une pince positive permet d'insérer tout type de filament et d'assurer sa trajectoire grâce à l'utilisation de pinces de micro chirurgie de grande précision. Cependant, c'est un système plus complexe et plus cher que le système d'insertion à lance tubulaire. Ce dernier ne peut être envisagé qu'avec des filaments métalliques relativement rigides.

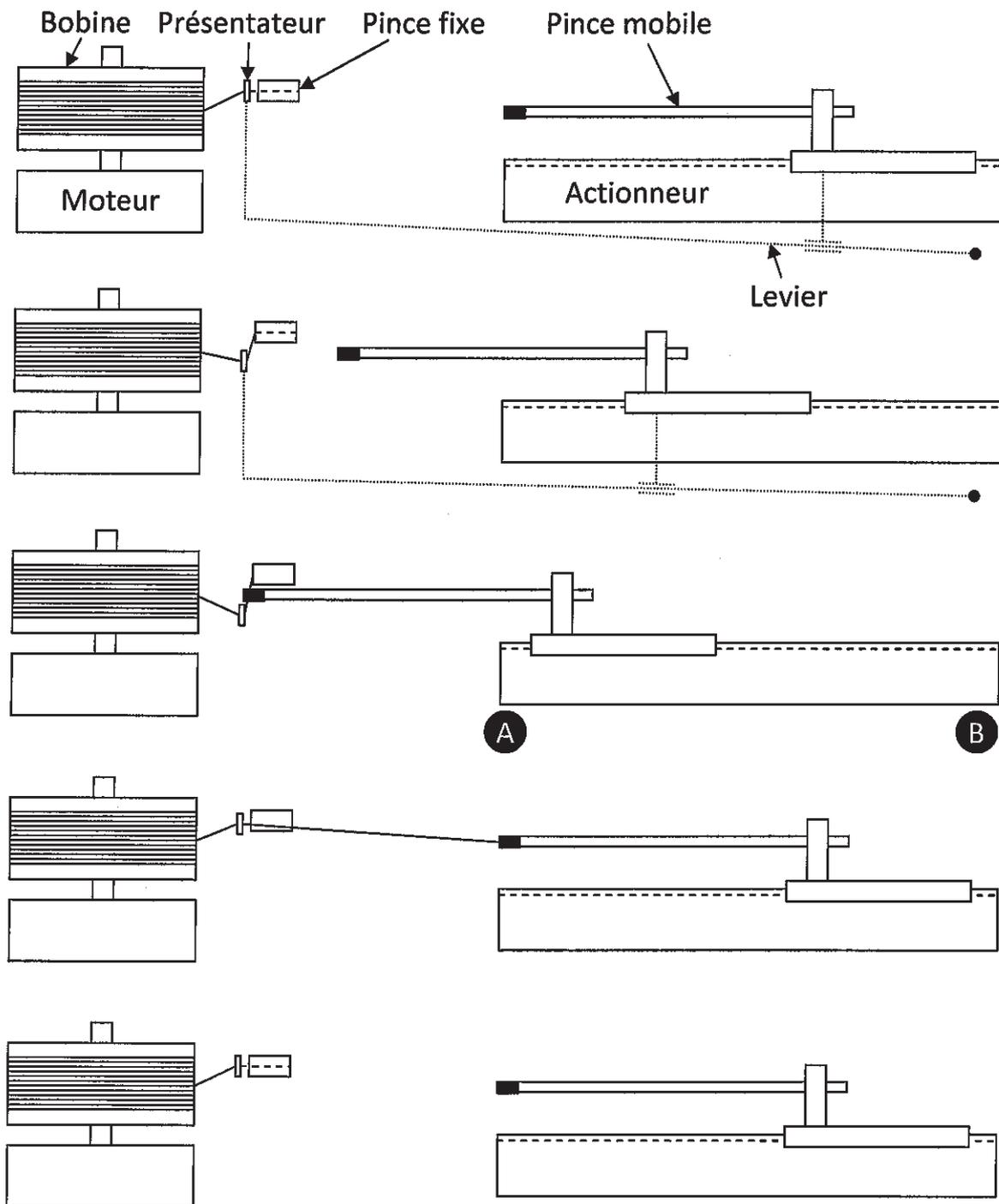


Figure 3-21 : Schéma du principe d'insertion à lance avec une pince positive

3.4. Le dis positif du mouvement de peigne :

Deux lentilles de diffraction de la lumière de référence « HDR300-Ni » [ELE.00] collées ensemble et montées sur un cadre ont été utilisées comme un peigne. La lentille est de 3,05 mm de diamètre et de 20 μm d'épaisseur. La largeur des dents est de 38 μm , elles sont séparées d'une distance de 45 μm .

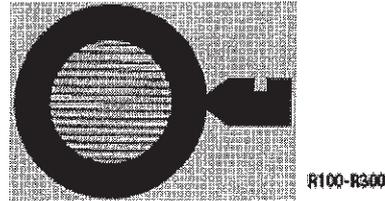


Figure 3-22 : Lentille avec une grille avec des barres parallèles

Le peigne est monté sur un actionneur pneumatique de précision à double effet de référence « MPS-1M-1 » [CCM.00] ou un actionneur de précision à entraînement électromagnétique de référence « NT 60-25/5A » [IKO.00]. L'actionneur pneumatique peut être commandé à l'aide d'un distributeur de type « 2/3 » permet de commander l'actionneur. L'actionneur à entraînement électromagnétique est piloté par une unité de référence « TDL1-1600 » [IKO.00].

Le premier essai a pu montrer la possibilité de fabriquer le peigne selon la même technologie utilisée pour la fabrication de ce type de lentilles.

Pour calculer la force qu'une dent doit supporter, on va considérer que la dent est une poutre rectiligne de longueur L encadrée à ses deux extrémités et qu'elle subit une force concentrée en son milieu P (Figure 3-23). Cela revient à calculer une structure élastique hyperstatique.

Pour résoudre ce problème on va transformer la structure en structure isostatique en remplaçant l'encastrement au point A par un moment d'encastrement M_A et la réaction R_A (Figure 3-23). Selon la méthode des « moments d'aires » [DEN.77] qui est une méthode permettant de calculer la déformée d'une poutre par intégration géométrique, on peut écrire :

$$\begin{cases} y'_A = \frac{1}{EI} \sum U \\ y_A = \frac{1}{EI} \sum M_U \end{cases} \quad \text{Équation 3-31}$$

Avec :

y'_A est la pente de la courbe de poutre au point A après sa déformation

y_A est la flèche de poutre au point A après sa déformation

$\sum U$ est la somme des surfaces des moments fléchissants

$\sum M_U$ est la somme des moments des surfaces des moments fléchissants

E est le module de Young de la poutre

I est le moment quadratique de la section droite de la poutre

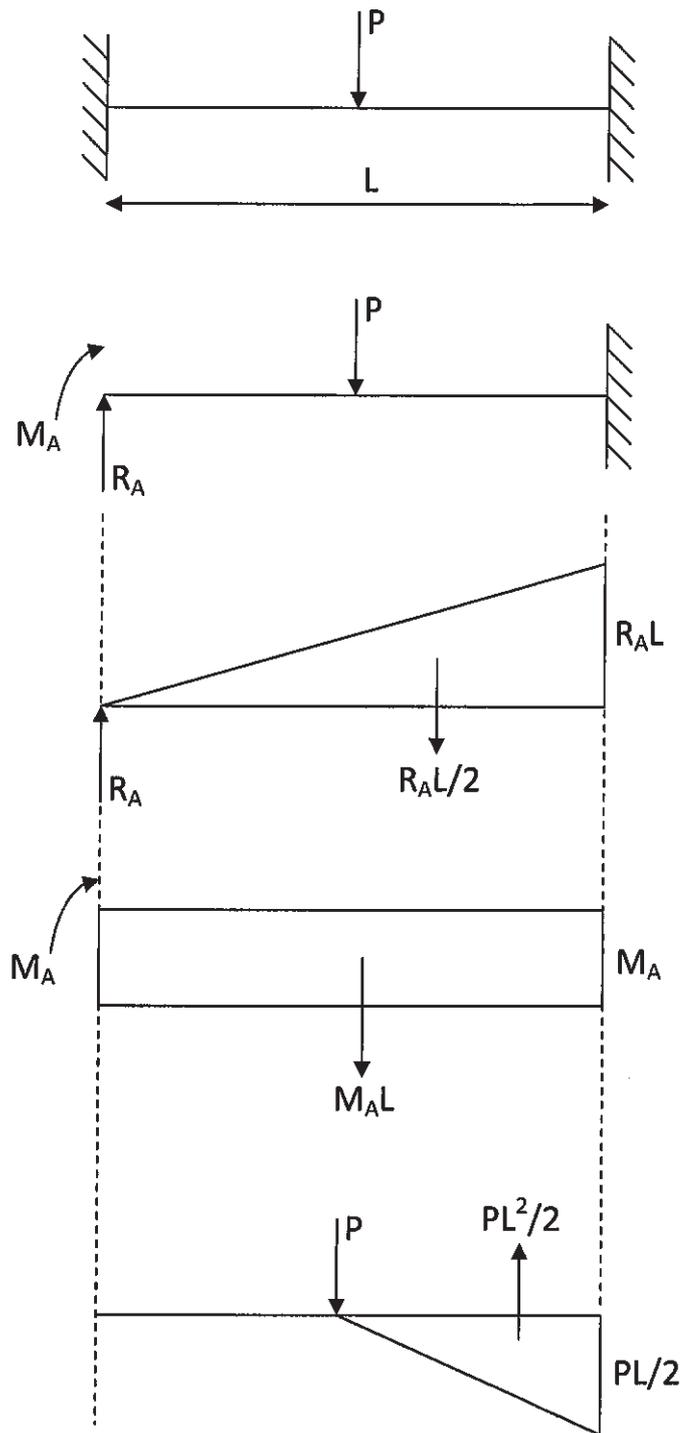


Figure 3-23 : Schéma d'une poutre encastree à ses deux extrémités et diagrammes des moments fléchissant

$$\begin{cases} y'_A = \frac{1}{EI} \left[\frac{R_A \times L^2}{2} + M_A \times L - \frac{P \times L^2}{8} \right] \\ y_A = \frac{1}{EI} \left[-\frac{R_A \times L^2}{2} \times \frac{2L}{3} - M_A \times L \times \frac{L}{2} + \frac{P \times L^2}{8} \times \frac{5L}{6} \right] \end{cases} \quad \text{Équation 3-32}$$

Or, les conditions au point d'encastrement A :

$$\begin{cases} y'_A = 0 \\ y_A = 0 \end{cases} \quad \text{Équation 3-33}$$

Donc :

$$\begin{cases} \frac{1}{EI} \left[\frac{R_A \times L^2}{2} + M_A \times L - \frac{P \times L^2}{8} \right] = 0 \\ \frac{1}{EI} \left[-\frac{R_A \times L^2}{2} \times \frac{2L}{3} - M_A \times L \times \frac{L}{2} + \frac{P \times L^2}{8} \times \frac{5L}{6} \right] = 0 \end{cases} \quad \text{Équation 3-34}$$

et par la suite :

$$\begin{cases} M_A = -\frac{P \times L}{8} \\ R_A = \frac{P}{2} \end{cases} \quad \text{Équation 3-35}$$

On peut calculer la pente et la flèche au milieu de la poutre :

$$\begin{cases} y'_C = \frac{1}{EI} \left[-R_A \times \frac{L^2}{4} - R_A \times \frac{L^2}{8} - M_A \times \frac{L}{2} + P \times \frac{L^2}{8} \right] \\ y_C = \frac{1}{EI} \left[-R_A \times \frac{L^3}{16} - R_A \times \frac{L^3}{24} - M_A \times \frac{L^2}{8} + P \times \frac{L^3}{24} \right] \end{cases} \quad \text{Équation 3-36}$$

$$\begin{cases} y'_C = 0 \\ y_C = -\frac{5}{192} \times \frac{PL^3}{EI} \end{cases} \quad \text{Équation 3-37}$$

Donc la flèche maximale se trouve au milieu de la poutre et vaut à y_C

Pour assurer la rigidité de la dent, la contrainte maximale doit être inférieure à la contrainte admissible σ_{adm}

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} \times x}{I} \leq \sigma_{adm} \quad \text{Équation 3-38}$$

Avec x , distance du point où se trouve la contrainte maximale à la fibre neutre.

Or pour une poutre de section rectangulaire d'une largeur b et d'une hauteur h , on peut écrire :

$$I = \frac{bh^3}{12}; x = \frac{h}{2} \quad \text{Équation 3-39}$$

Donc

$$\sigma_{\max} = \frac{6PL}{8bh^2} \leq \sigma_{adm} \quad \text{Équation 3-40}$$

Ainsi la force qu'une dent peut supporter est donnée par :

$$P \leq \sigma_{adm} \times \frac{8bh^2}{6L} \quad \text{Équation 3-41}$$

Pour augmenter la rigidité des dents du peigne, il faut fabriquer le peigne d'une épaisseur plus élevée ou il faut coller deux peignes ensembles.

3.5. L'enrouleur du tissu :

Le cylindre poitrinière permet de dévier le tissu et de le maintenir dans le plan de tissage. Le cylindre d'appel est monté sur une table rotative de grande précision de référence « MM-4M-R » [NAT.00] équipé d'un réducteur de vitesse de rapport 5647:1 intégré (Figure 3-24).

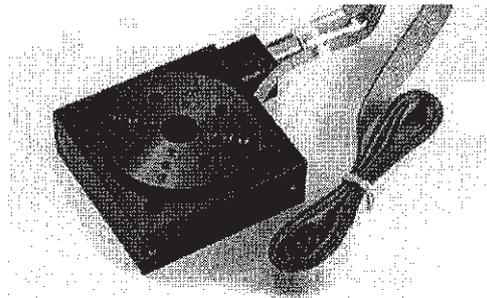


Figure 3-24 : Table motorisée de précision

La rotation du cylindre d'appel permet l'avance régulièrement le tissu. Pour empêcher le glissement, le rouleau de renvoi permet d'augmenter la surface de contact du tissu sur le cylindre d'appel. Il permet également de couper le tissu sans arrêter la machine à tisser. Le rouleau de toile est pressé par un ressort contre le cylindre d'appel et il est entraîné tangentiellement à partir de ce dernier. Le tissu est stocké sur le rouleau de toile.

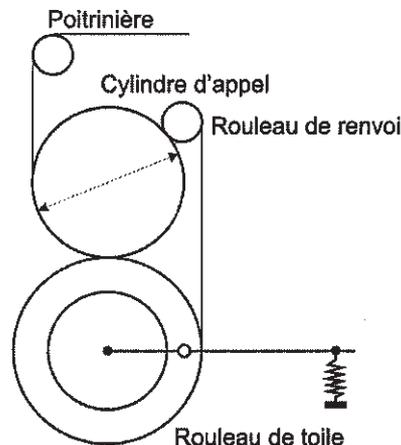


Figure 3-25 : Schéma de dispositif d'enroulement du tissu

Le choix de la table motorisée dépend de deux critères : l'incrément minimal et le couple nominal que la table peut produire.

En effet, pour fabriquer un tissu avec un duitage d'une valeur D (nombre de duites par centimètre) l'avancée de tissu à chaque cycle du tissage doit être égale à :

$$a = \frac{1}{D} \quad \text{Équation 3-42}$$

Or le diamètre du cylindre d'appel est égale à d , donc on peut écrire l'avancé du cylindre d'appel exprimée en degrés :

$$\alpha = \frac{360}{\pi} \times \frac{a}{d} = \frac{360}{\pi \times d \times D} \quad \text{Équation 3-43}$$

et la valeur de l'incrément minimal que la table peut proposer est :

$$\alpha_{\min} = \frac{360}{\pi} \times \frac{a}{d} = \frac{360}{\pi \times d \times D_{\max}} \quad \text{Équation 3-44}$$

Le couple nécessaire pour faire avancer le tissu doit s'opposer à la tension des filaments. Pour une nappe de N filaments tendue avec une tension T , la force nécessaire pour maintenir la nappe en équilibre est de :

$$F = N \times T \quad \text{Équation 3-45}$$

et le couple sur l'axe du cylindre d'appel devient :

$$C = F \times \frac{d}{2} = N \times T \times \frac{d}{2} \quad \text{Équation 3-46}$$

Le couple nominal de la table motorisée doit être supérieur au couple C .

3.6. Le dis positif de formation de la foule :

Le dispositif de formation de la foule permet de séparer la nappe des fils de chaîne. Il doit former une foule d'une hauteur suffisante pour pouvoir passer le vecteur du dispositif d'insertion de trame. Dans notre cas la hauteur minimale de la foule doit être d'une valeur de 1 mm.

Notre but est de construire une machine de tissage avec un dispositif de formation de la foule de type Jacquard, ce qui veut dire la capacité de commander individuellement chaque fils de chaîne.

Le dispositif de formation de la foule est donc composé d'une série de micro-actionneurs.

Deux valeurs sont nécessaires à la conception de l'actionneur :

- l'amplitude de mouvement,
- la force nécessaire pour lever un fil.

L'amplitude de mouvement doit être égale à la hauteur de la foule. Pour calculer la force nécessaire pour lever un fil en fonction de la hauteur de la foule, on va dessiner le schéma d'une foule ouverte (Figure 3-26). Le fil de chaîne maintenu en équilibre sous l'effet de son propre poids P ($P=P'+P''$), sa tension T donnée par le dérouleur de chaîne, et la force donnée par l'actionneur N .

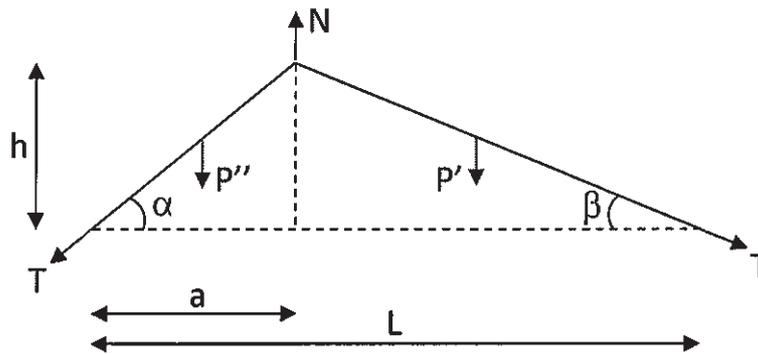


Figure 3-26 : Schéma de foule ouverte

En écrivant l'équilibre mécanique du fil, on peut trouver la force nécessaire pour lever un fil :

$$N = \frac{P}{2} + T[\sin \alpha + \sin \beta] \quad \text{Équation 3-47}$$

Or la hauteur de la foule est beaucoup plus petite que la distance a et L , donc les angles α et β sont petits et on peut écrire :

$$\begin{cases} \sin \alpha \approx \tan \alpha \approx \frac{h}{a} \\ \sin \beta \approx \tan \beta \approx \frac{h}{(L-a)} \end{cases} \quad \text{Équation 3-48}$$

Ce qui entraîne :

$$N = \frac{P}{2} + Th \times \left[\frac{1}{(L-a)} + \frac{1}{a} \right] \quad \text{Équation 3-49}$$

En tenant compte d'une masse linéique t fils de chaîne, la force nécessaire pour lever un fil devient :

$$N = \frac{t \times L}{2} + Th \times \left[\frac{1}{(L-a)} + \frac{1}{a} \right] \quad \text{Équation 3-50}$$

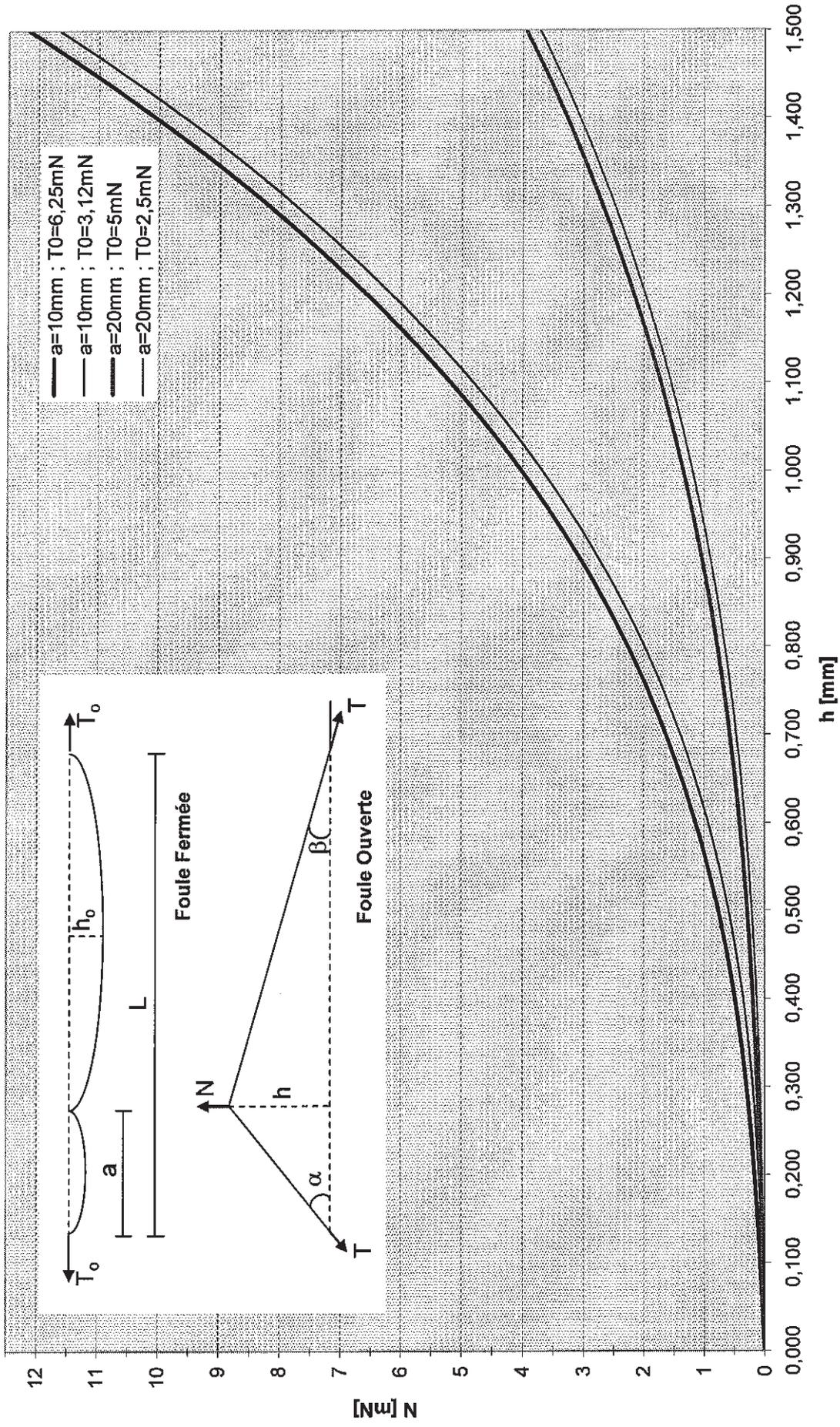


Figure 3-27 : La force nécessaire pour lever un filament en fonction de la hauteur de la foule

La tension de fils de chaîne lors de l'ouverture de la foule a déjà été calculée (équation 3-22). La figure 3-27 montre la variation de la force nécessaire pour lever un filament de cuivre de $25 \mu\text{m}$ de diamètre tendu sur une distance $L=110 \text{ mm}$ en fonction de la hauteur de la foule, l'emplacement de l'actionneur a et la tension de base T_0 du filament donnée par le régulateur de tension.

On peut constater que la force de levage augmente très rapidement avec l'augmentation de la hauteur de la foule. Pour une « grande » ouverture de la foule ($h>0,7 \text{ mm}$), la tension de base n'a pas beaucoup d'effet sur la force nécessaire pour lever le filament. L'augmentation de la distance a permet de diminuer la force de levage, donc plus l'actionneur est proche du milieu du filament plus la force nécessaire pour lever un fil devient plus petite.

La figure 3-27 nous permet également de déterminer la géométrie de la foule en fonction de la hauteur de foule souhaitée (en fonction de dimensions du vecteur du système d'insertion de trame) et la puissance de l'actionneur.

La réalisation d'un dispositif de formation de la foule en transposant les mécanismes d'un système Jacquard traditionnelle à l'échelle micro (passage de macro à micro) s'avère impossible. En effet l'ensemble des pièces ainsi réalisé ne peuvent pas répondre à leurs fonctions mécaniques. D'autres phénomènes d'adhésion liés aux forces de surface et aux forces électrostatiques deviennent importants à cette échelle et ils limitent l'utilisation du système de Jacquard traditionnel.

De ce fait on a mis au point plusieurs solutions qui seront détaillés dans les pages suivantes.

3.6.1. Mécanique Jacquard « première idée » :

Chaque filament de la nappe de chaîne est passé dans une lisse (Figure 3-28). Un bloc de 128 (16x8) actionneurs de flexions piézoélectriques permet de commander individuellement les lisses. Chaque lisse est reliée à un actionneur et à un ressort, elle est passée dans une planche de guidage. Le ressort permet de rappeler la lisse à sa position initiale.

Ce principe a été rejeté car il possède les inconvénients suivants :

- s'est un système relativement cher et complexe,
- la mise à niveau des lisses est très difficile,
- la fabrication des lisses de $100 \mu\text{m}$ de diamètre avec un trou de $40 \mu\text{m}$ diamètre est très difficile,

- le coût de la fabrication d'une planche de guidage avec des trous de 50 μm est très élevé,
- le liage entre les actionneurs et les lisses d'un coté et les ressorts et les lisses de l'autre coté est difficile à réaliser,
- le rentrage des filaments de la nappe de chaîne dans les lisses est très compliqué et fastidieux,
- il ne faut pas oublier également les problèmes liés au frottement et à l'usure entre les lisses et la planche et entre les lisses et les filaments.

L'idée de replacer les actionneurs piézoélectrique par des actionneurs à mémoire de forme a été également rejetée à cause des contraintes précédentes et à cause du temps de réponse élevée de ce type d'actionneurs. À cela s'ajoutent les problèmes liés à la transmission de la chaleur entre les actionneurs qui perturbent leur fonctionnement.

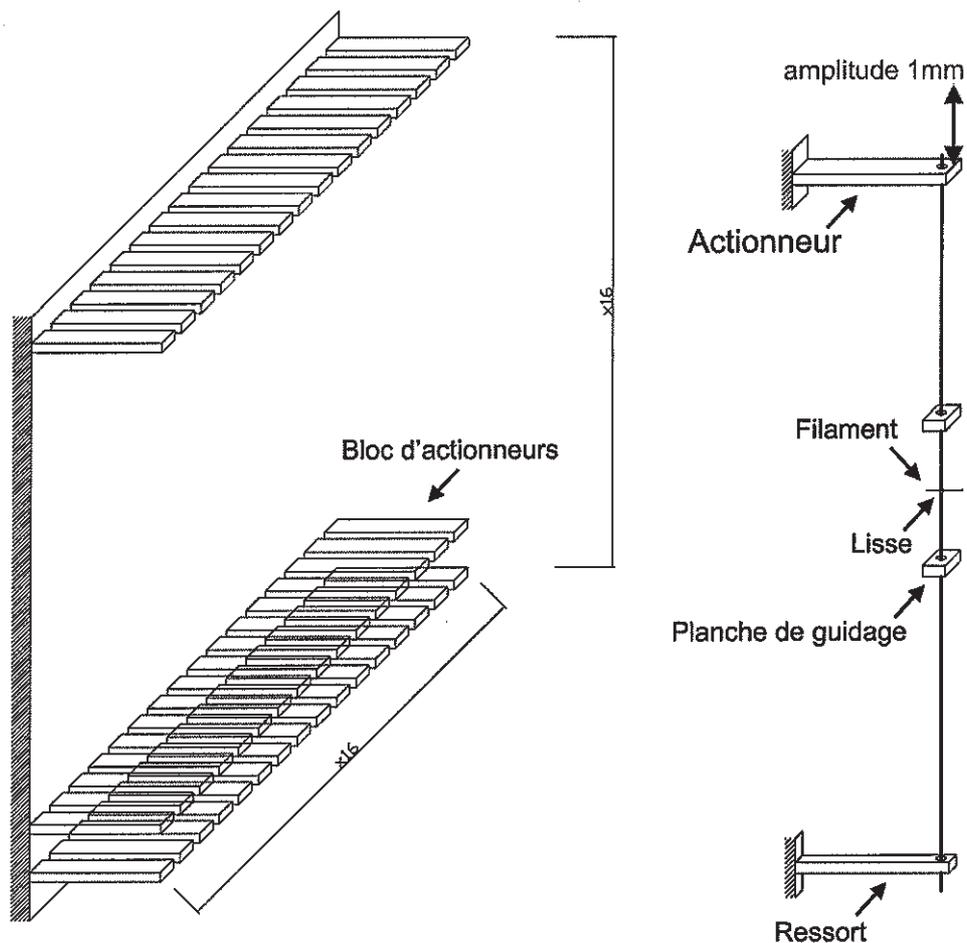


Figure 3-28 : Principe de mécanique Jacquard « première idée »

3.6.2. Dispositif de formation de la foule par action directe :

Pour éviter les inconvénients liés à la fabrication des lisses et au rentrage des filaments. Ce système est constitué d'un bloc de 128 actionneurs repartis sur une seule rangée et commandés individuellement (Figure 3-29).

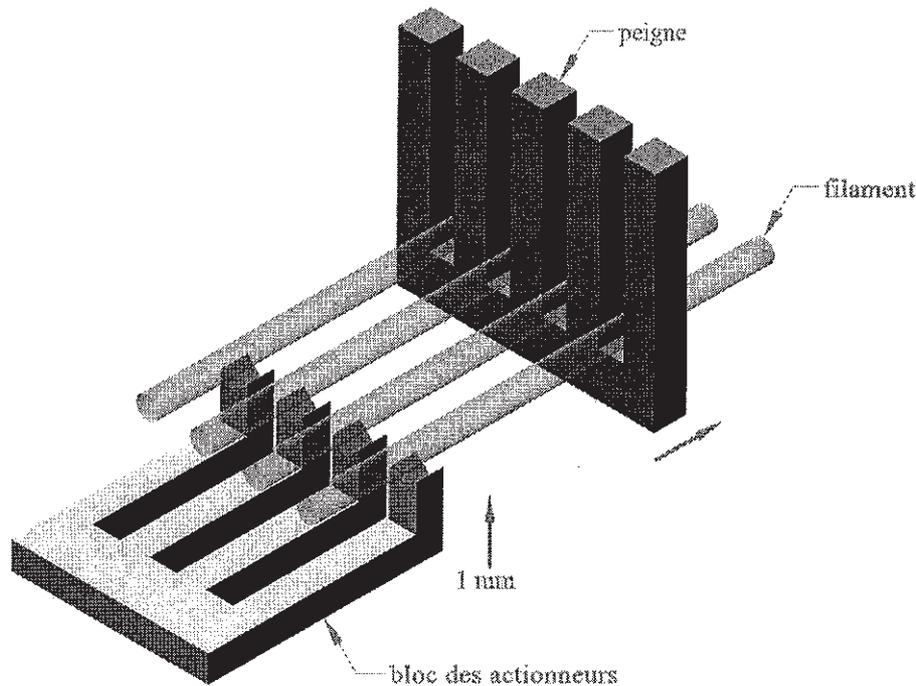


Figure 3-29 : Dispositif de formation de la foule par action directe

Chaque actionneur permet de commander directement un filament de chaîne. Le peigne joue également un rôle de guidage des filaments.

L'amplitude maximale ΔX qu'un actionneur de flexion piézoélectrique (Figure 3-30) peut reproduire est donnée par les deux formules suivantes selon le type de connexion [PIE.00] :

$$\text{Connexion en série : } \Delta X = \frac{2L^2 \times V \times d_{31}}{T^2} \quad \text{Équation 3-51}$$

$$\text{Connexion parallèle : } \Delta X = \frac{4L^2 \times V \times d_{31}}{T^2} \quad \text{Équation 3-52}$$

Avec :

L est la longueur de l'actionneur

V est le champ électrique appliqué

d_{31} est la constante piézoélectrique du matériau utilisé

T est l'épaisseur de l'actionneur

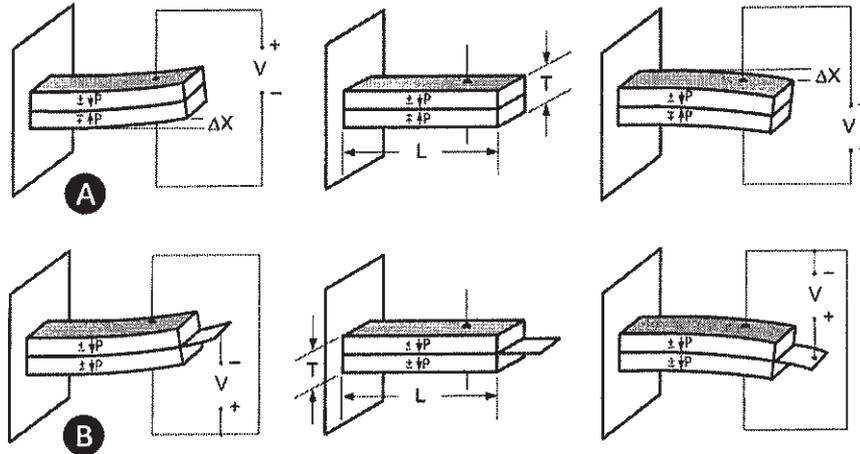


Figure 3-30 : Actionneur de flexion, A – connexion en série, B – connexion parallèle [PIE.00]

A partir des équations précédentes on peut constater que l'amplitude maximale de l'actionneur augmente soit en augmentant le champ électrique appliqué soit en utilisant un actionneur d'une longueur plus élevée.

Or la raideur d'un actionneur de flexion piézoélectrique est donnée par la formule suivante :

$$K = \frac{3E \times I}{L^3} \quad \text{Équation 3-53}$$

Avec :

E est le module d'Young du matériau piézoélectrique utilisé,

I est le moment quadratique de la section droite de l'actionneur.

Donc la raideur de l'actionneur diminue rapidement en augmentant sa longueur, et l'idée de fabriqué un actionneur piézoélectrique de faible dimensions capable de lever un filament d'une hauteur d'un millimètre est quasi impossible.

3.6.3. Dispositif de formation de la foule par sélection :

La force nécessaire pour déplacer le filament de la nappe de chaîne d'une petite distance (quelques dizaines de micromètres) est faible (Figure 3-27). Cet avantage nous a permis d'avoir l'idée de séparer le système de formation de la foule en deux parties (Figure 3-33) :

- Partie puissance : il s'agit d'un bloc des doigts pousoirs solidaires entre eux. Le bloc est commandé par un seul actionneur (Figure 3-31). Chaque doigt se trouve en dessous d'un filament de la nappe de chaîne. Le mouvement du bloc vers le haut permet de lever tous les filaments pour former une foule d'un millimètre de haut.
- Partie sélection : il s'agit d'un bloc des micros actionneurs de flexion piézoélectrique. Chaque micro actionneur est commandé individuellement. Cette partie permet de

désélectionner les filaments qu'ils doivent former des laissées (se trouvent en dessous de fil de trame) en déviant transversalement les filaments de la trajectoire des doigts pousoirs (Figure 3-32). Les doigts pousoirs passent à coté des filaments désélectionnés et les filaments désélectionnés restent à leur place. Les filaments sélectionnés sont poussés par le bloc de doigts.

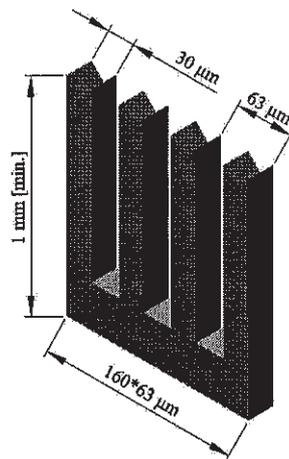


Figure 3-31 : Bloc des doigts pousoirs

Dans le cas d'un filament de chaîne de 25 µm de diamètre, l'actionneur doit pouvoir dévier le filament d'une distance de 30 µm. La force nécessaire pour pouvoir effectuer cette déviation est de l'ordre de 50 µN.

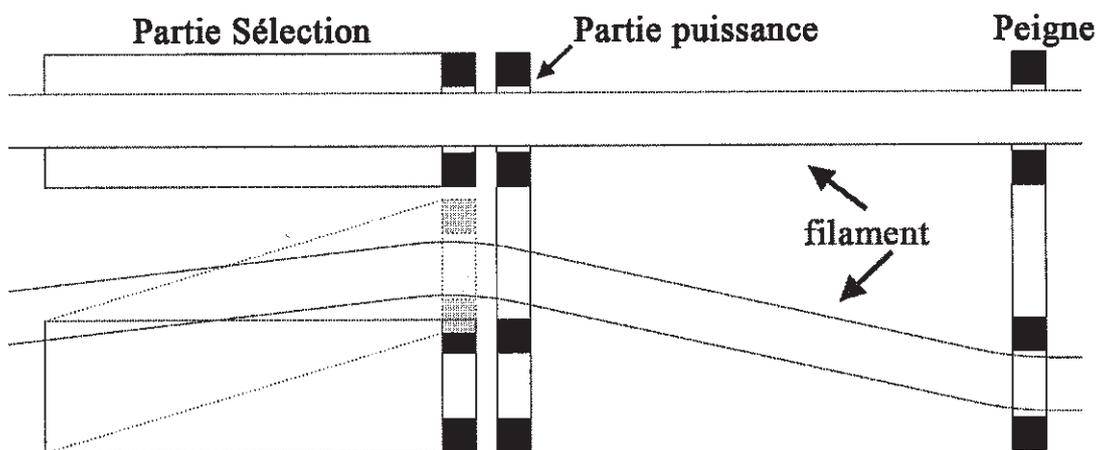


Figure 3-32 : Principe de sélection (vue de dessus)

Trois systèmes ont été conçus :

3.6.3.1. Sélection par un bloc d'actionneurs de flexion transversale :

La partie sélection est constituée d'un bloc de micro actionneurs de flexion transversale (Figure 3-33). Chaque actionneur peut effectuer un mouvement transversal de $30\ \mu\text{m}$. Ce mouvement permet de dévier le filament ainsi de désélectionner ce filament.

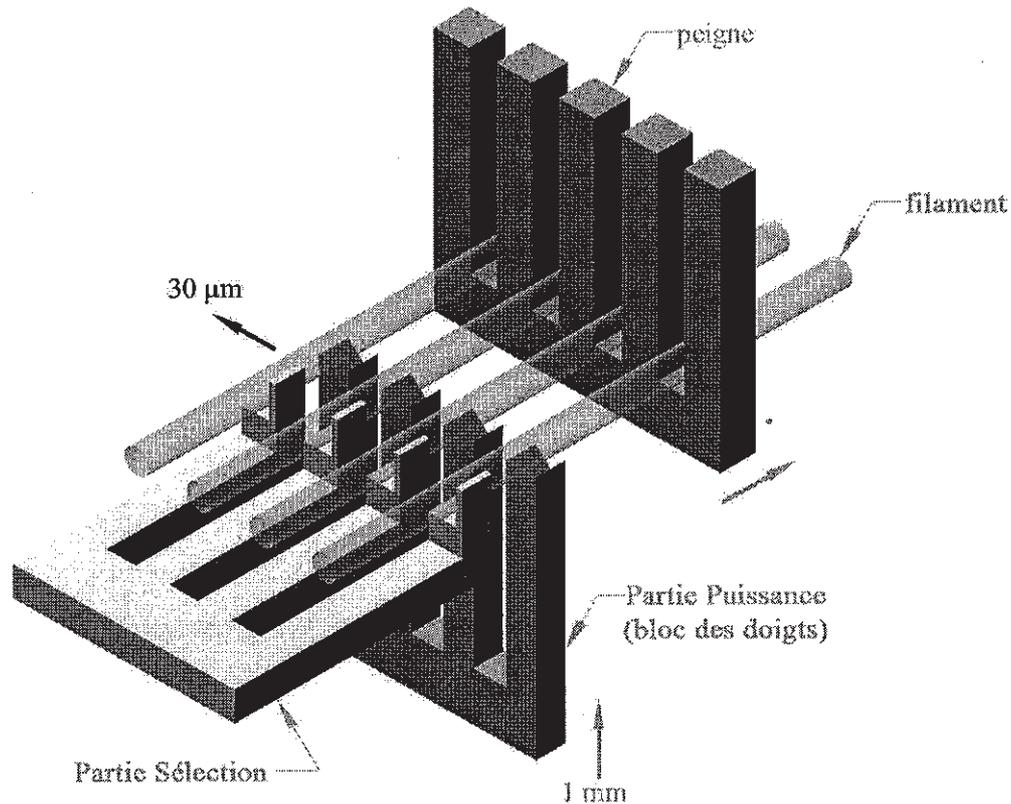


Figure 3-33 : Sélection par un bloc des actionneurs de flexion transversal

3.6.3.2. Sélection par un bloc d'actionneurs de flexion :

La partie sélection est constituée d'un bloc des micros actionneurs de flexion (Figure 3-34). Chaque actionneur peut effectuer un mouvement de $35\ \mu\text{m}$ et il est équipé d'une dent. Le bloc des micros actionneurs peut effectuer un mouvement transversal de $30\ \mu\text{m}$.

Pour désélectionner un filament : l'actionneur correspondant fléchit d'une distance de $35\ \mu\text{m}$. Ce mouvement permet de mettre la dent de l'actionneur au niveau du filament. Le mouvement transversal du bloc des micros actionneurs permet de dévier le filament.

Les dents des actionneurs correspondant aux filaments sélectionnés passent en dessous des filaments.

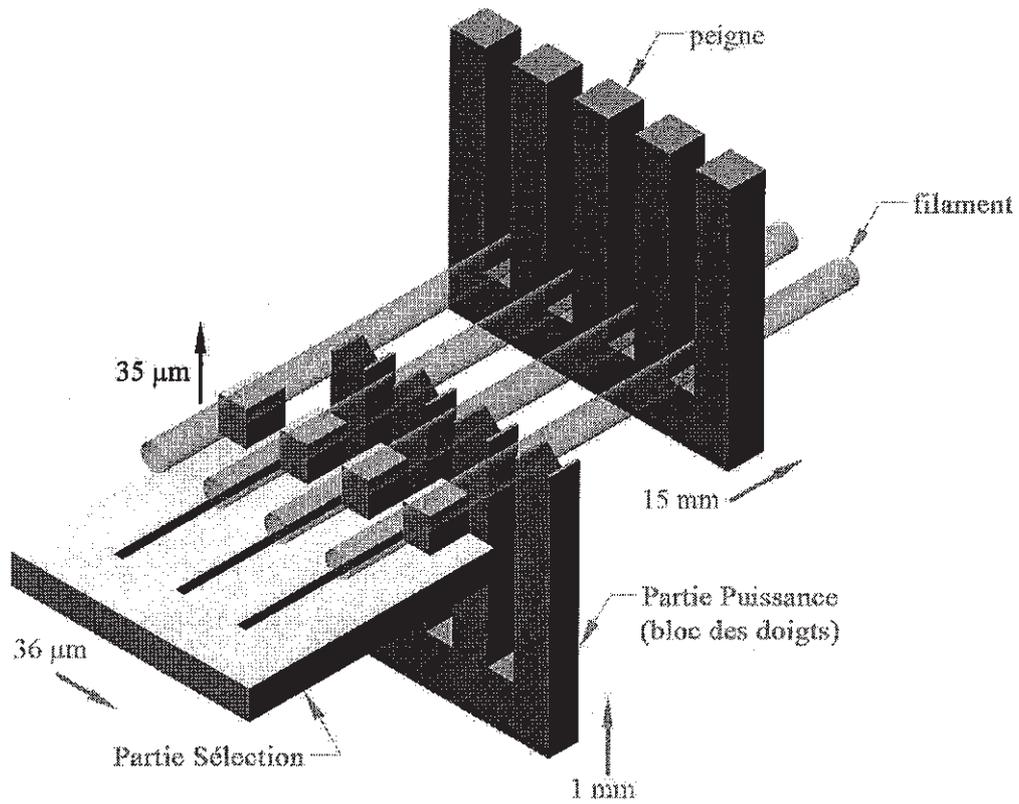


Figure 3-34 : Sélection par un bloc des actionneurs de flexion

3.6.3.3. Sélection par un bloc d'actionneurs de flexion à l'aide du peigne :

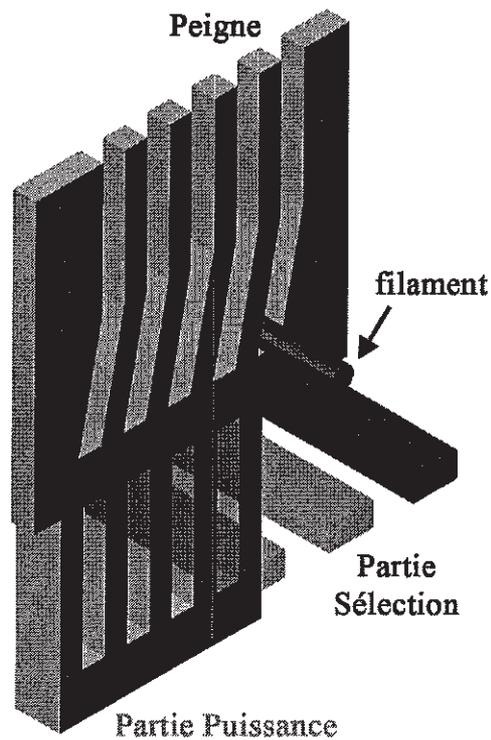


Figure 3-35 : Sélection par un bloc d'actionneurs de flexion à l'aide du peigne

La partie sélection est constituée d'un bloc de micro actionneurs de flexion (Figure 3-35). Chaque actionneur peut effectuer un mouvement de $50\ \mu\text{m}$. la forme spéciale du peigne permet de transformer le mouvement vertical de filament en mouvement transversal. Ce mouvement permet de dévier les filaments désélectionnés.

L'inconvénient majeur des trois systèmes précédents est la capacité de la partie puissance à produire la force nécessaire pour lever le filament. En fait, les doigts pousoirs risquent de flamber sous l'effet de cette force vue la grande valeur du rapport de dimensions entre la hauteur du doigt pousoir (environ $1\ \text{mm}$) et sa largeur (environ $65\ \mu\text{m}$).

3.6.4. Dispositif de formation de la foule par sélection à l'aide d'une pince :

Pour résoudre le problème de rigidité de la partie puissance, on a remplacé le bloc des doigts par un bloc de multi pinces (Figure 3-36). En effet, le bloc multi pinces est constitué de deux mâchoires. Chaque mâchoire est équipée de plusieurs mors. Le mouvement transversal de $10\ \mu\text{m}$ des mâchoires permet de fermer et d'ouvrir le bloc des multi pinces. Le mouvement vertical de ce dernier permet de lever les filaments sélectionnés. Ce qui permet de former la foule.

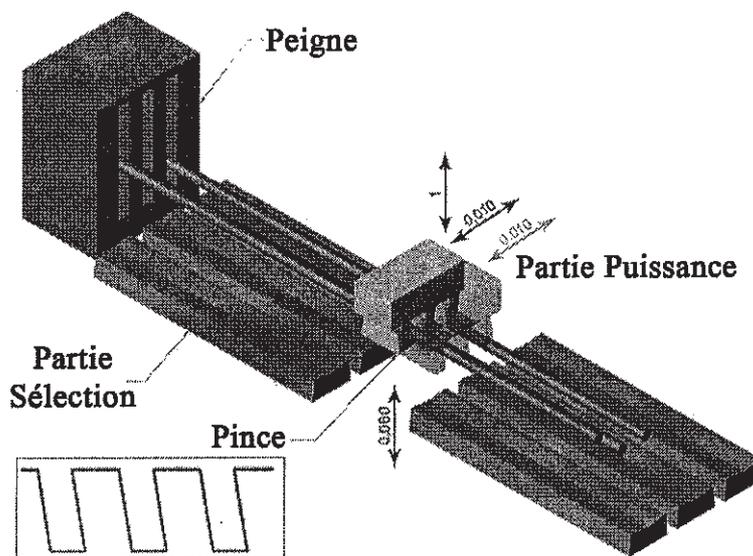


Figure 3-36 : Dispositif de formation de la foule par sélection à l'aide d'une pince

La partie sélection est constituée d'un bloc de micro actionneurs de flexion. Chaque actionneur peut effectuer un mouvement vertical de $60\ \mu\text{m}$. ce mouvement permet de placer le filament sélectionné entre les mâchoires du bloc de multi pinces (Figure 3-37).

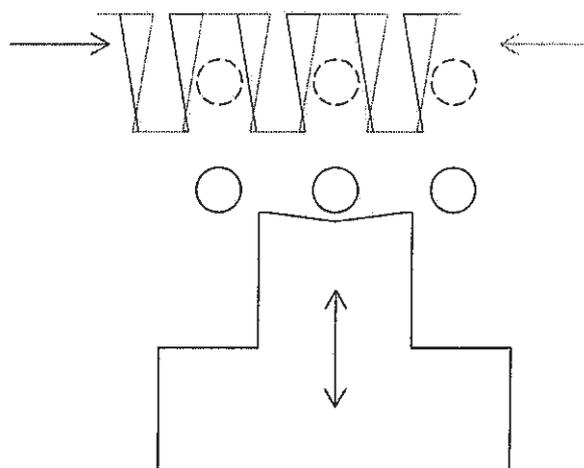


Figure 3-37 : principe de fonctionnement du Dispositif de formation de la foule par sélection à l'aide d'une pince

Ce système n'a également pas été adopté à cause du risque de perturbation de la sélection dû à la force d'interaction (électrostatique, adhésion,...) entre les filaments et les mâchoires du bloc de multi pinces.

Les réunions avec la société CSEM¹ en Suisse et le laboratoire ISIS à Strasbourg ont montré l'incapacité des micro-actionneurs (piézoélectriques ou électrostatiques) à réaliser un système de formation de la foule. Ainsi ces réunions ont conduit à l'idée de la réalisation des micro-actionneurs en micro fluidique.

3.6.5. Dispositif de formation de la foule par des actionneurs micro fluidique :

Ce principe consiste à envoyer l'air comprimé dans un canal gravé dans une structure de structure PDMS par la méthode de micro-fabrication soft-lithographie. Chaque filament de la nappe de chaîne est enfilé dans la rainure d'un actionneur. La pression dans la rainure permet de pousser le fils (Figure 3-38). Un bloc de micros actionneurs permet de commander tous les filaments de la nappe ainsi de former la foule.

Pour pouvoir tester la faisabilité de ce type d'actionneur, quatre actionneurs ont été fabriqués avec différentes combinaisons de matériaux (verre-PDMS-verre, PDMS-PDMS-PDMS, Verre-PDMS, PDMS-PDMS).

¹ CSEM, Centre Suisse d' Electronique et de Microtechnique, www.csem.ch

La réalisation des actionneurs micro fluidique a été effectuée dans une salle blanche au sein de laboratoire ISIS à Strasbourg.

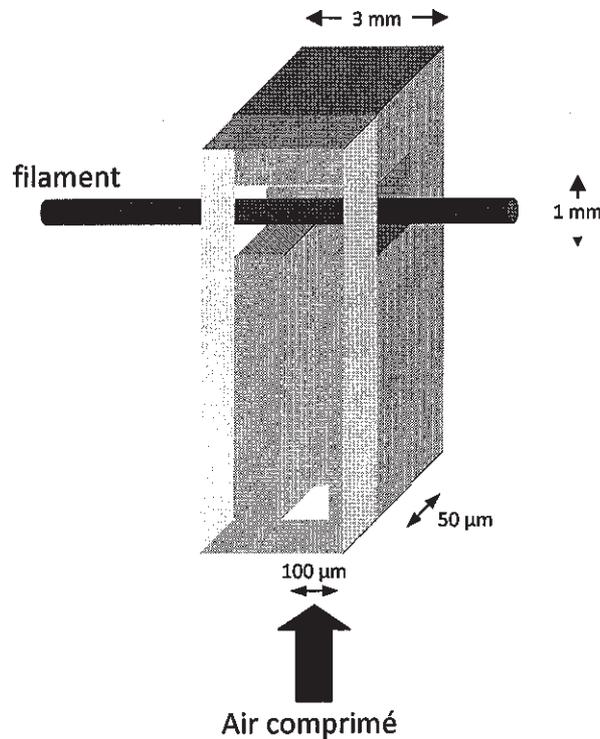


Figure 3-38 : Principe de micro-actionneurs par air comprimé

3.6.5.1. Premier modèle : « Verre – PDMS – Verre »

La figure 3 -40 montre le schéma de ce type de micro actionneur. La fabrication a été effectuée en trois étapes :

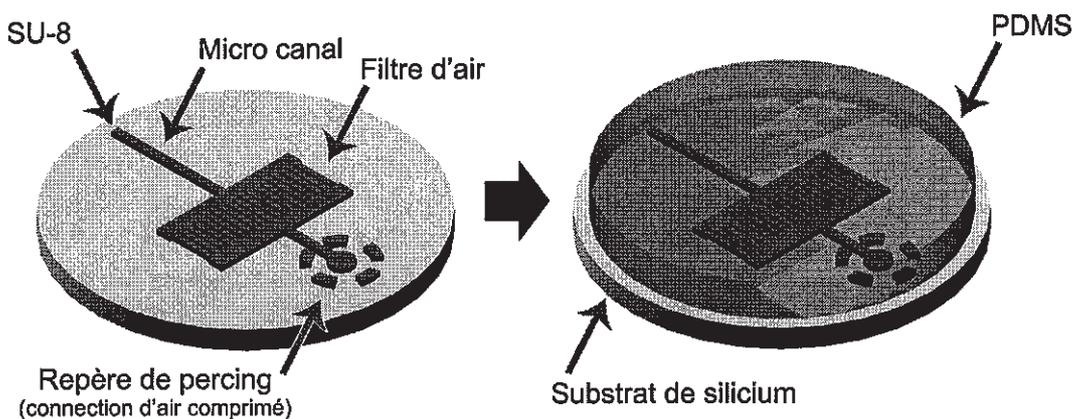


Figure 3-39 : Principe de fabrication de micro structure gravée dans une couche en PDMS

1. La fabrication du moule d'une épaisseur de 50 µm : une structure de micro canal d'une largeur de 50 µm a été dessinée à l'aide d'un logiciel de dessin CAO « AutoCad ». Ce dessin a été imprimé sur un masque à l'aide d'une imprimante de grande précision. Une

couche fine d'une matière photorésistante SU-8 a été coulée sur un substrat de silicium. La rotation de « spin coater » permet d'étaler le SU-8 sur le substrat de silicium de manière homogène. Ce substrat a été cuit deux fois puis exposé à un rayon ultra violet à partir du masque fabriqué. Par la suite, le substrat a été cuit deux fois puis le SU-8 a été développé. La vitesse de rotation de « spin coater », la température et le temps de cuisson permettent de contrôler l'épaisseur du moule (ou l'épaisseur de la couche de SU-8). Les paramètres de fabrication du moule sont donnés dans le tableau 2-1 (Page 72).

2. La fabrication d'une couche épaisse de PDMS: cette étape consiste à couler un mélange de PDMS et un rigidifiant d'un rapport 9 à 1 sur le moule fabriqué, dégazer la couche du mélange à l'aide d'une chambre sous vide, puis cuire cette couche dans un four à 65°C pendant deux heures.

3. l'étape précédente nous a permis de réaliser une structure de micro canal gravée dans une couche de PDMS. Cette couche a été détachée du moule puis coupée en deux morceaux. L'un de deux morceaux a été percé pour pouvoir connecter par la suite le tube d'alimentation de l'air comprimé. Un collage plasma a permis de coller les deux morceaux sur une lame de verre de microscope pour fermer le micro structure. La séparation de deux morceaux de PDMS a permis de réaliser la rainure. Un autre collage plasma a permis de coller l'autre coté des deux morceaux de PDMS sur une autre lame de verre pour fermer la rainure.

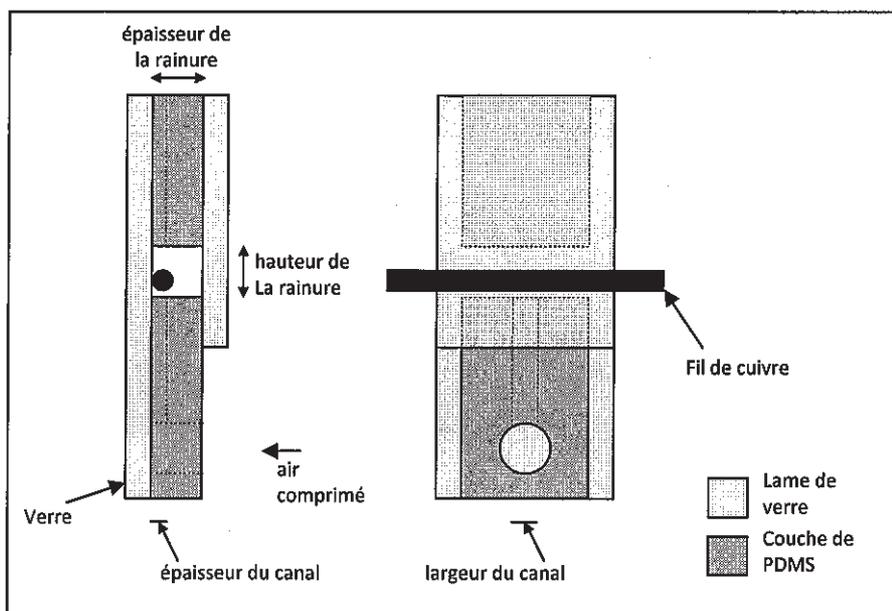


Figure 3-40 : Schéma d'un actionneur (Verre – PDMS – Verre)

3.6.5.2. Deuxième modèle : « PDMS – PDMS – PDMS »

Le moule qui a été réalisé pour fabriquer l'actionneur précédent a servi pour la fabrication d'une nouvelle couche de PDMS gravée par une structure de micro canal.

Une autre couche lisse de PDMS a été fabriquée en coulant un mélange de PDMS et de rigidifiant de rapport 9 à 1 sur un substrat de silicium vierge.

La différence entre cet actionneur et l'actionneur précédent c'est que la couche gravée par une structure de micro canal a été collée entre deux couches lisses de PDMS.

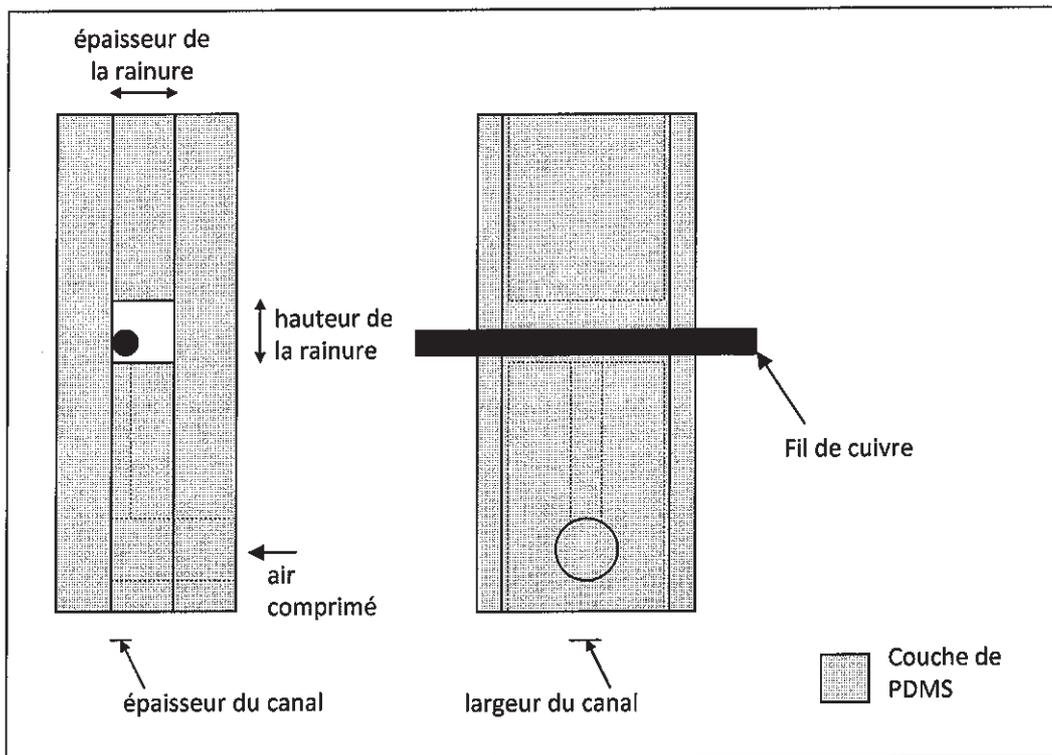


Figure 3-41 : Schéma d'un actionneur (PDMS – PDMS – PDMS)

3.6.5.3. Troisième modèle : « PDMS – Verre »

Un nouveau moule a été réalisé. Ce moule permet à la fois de réaliser une structure de micro canal et de réaliser la rainure où le filament de la nappe de chaîne doit passer (Figure 3-42).

La largeur du canal est de 50 μm et la largeur de la rainure est de 3 mm.

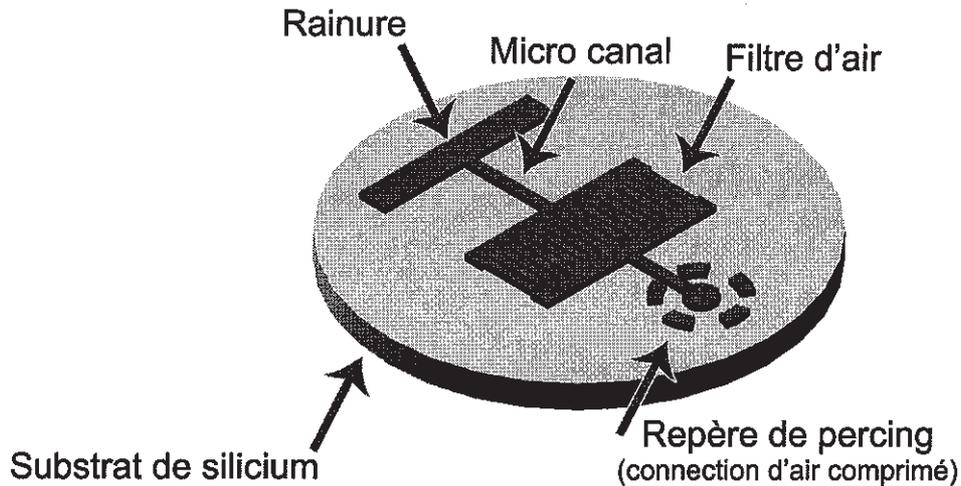


Figure 3-42 : Moule

La figure 3-43 représente la structure de ce micro actionneur. Une couche de PDMS a été coulée sur ce nouveau moule. Par la suite cette couche a été détachée, percée et collée sur une lame de verre de microscope pour fermer la micro structure (micro canal + rainure).

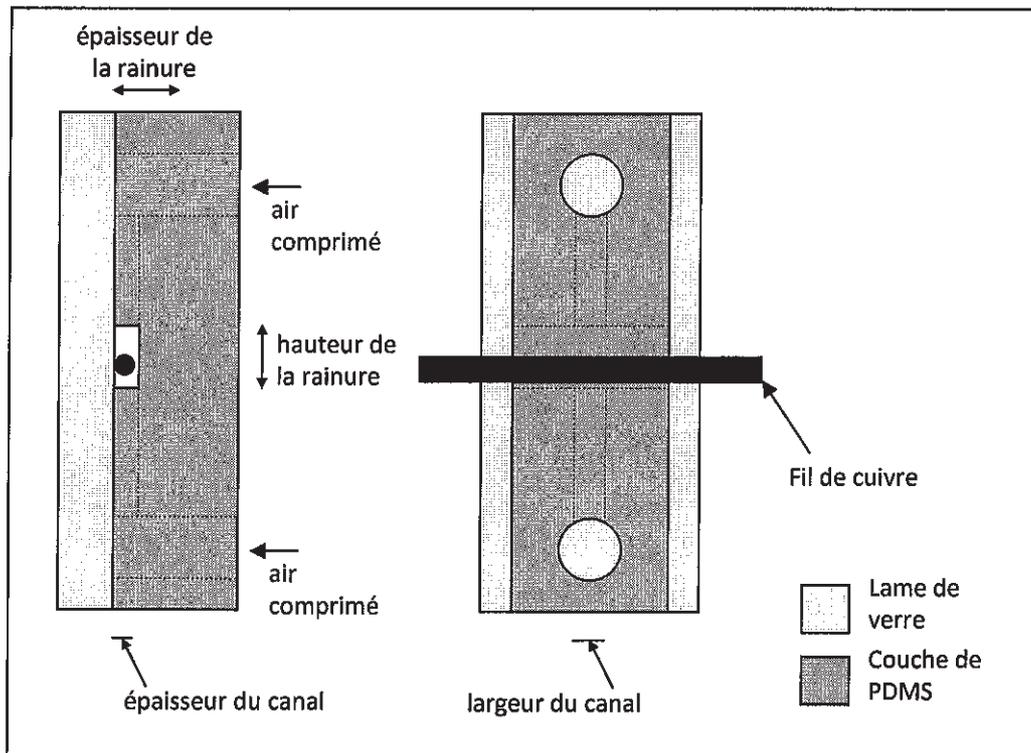


Figure 3-43 : Schéma d'un actionneur (PDMS – VERRE)

3.6.5.4. Quatrième modèle : « PDMS – PDMS »

La figure 3-44 montre la structure de ce micro actionneur. Une couche de PDMS a été coulée sur le nouveau moule.

Une autre couche lisse de PDMS a été coulée sur un substrat de silicium vierge.

La couche gravée a été percée. Les deux couches ont été collées ensemble pour fermer le micro structure (micro canal + rainure).

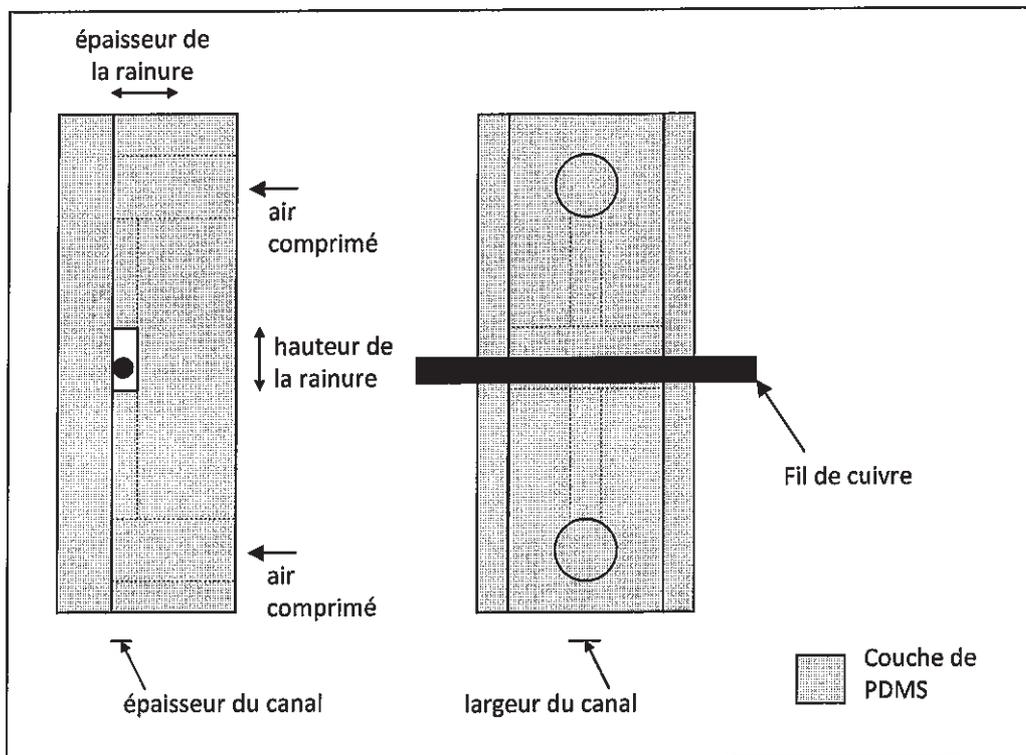


Figure 3-44 : Schéma d'un actionneur (PDMS – PDMS)

Les quatre actionneurs précédents ont été testés sur un plateau de mesure (Figure 3-45). Ce plateau a été fabriqué au sein de notre laboratoire. Il permet de mesurer l'amplitude de mouvement du filament en fonction de sa tension. Ceci permet d'évaluer l'efficacité de l'actionneur.

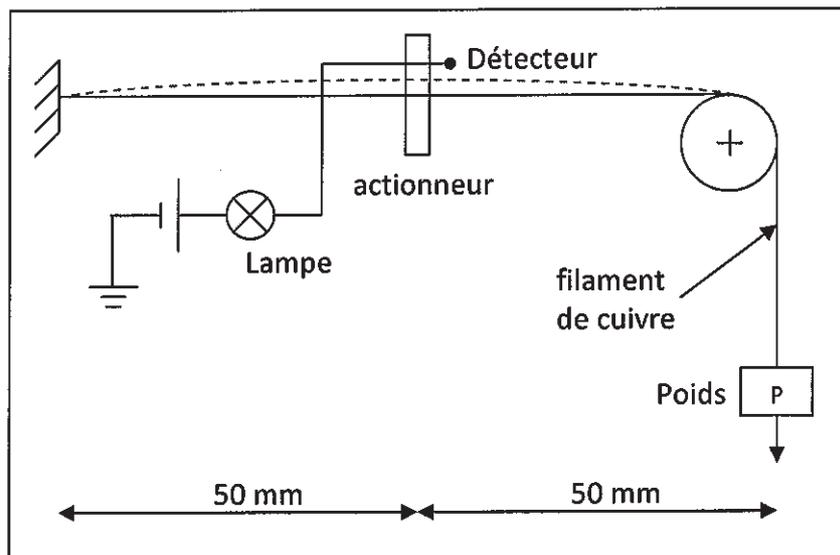


Figure 3-45 : Plateau de mesure

Le détecteur est monté sur une table micrométrique et il est relié à cathode d'une pile. Le filament de cuivre est relié à l'anode de la pile. Si le filament touche le détecteur la lampe s'allume. La position du détecteur permet de mesurer l'amplitude de mouvement.

Les actionneurs ont été alimentés par l'air comprimé à l'aide d'une seringue de 5ml reliée à l'actionneur par un tube en téflon.

Les résultats des actionneurs sont les suivants :

- Premier modèle : « Verre – PDMS – Verre »

Poids [mN]	6,10	11,00	29,00
Amplitude [mm]	1,8*	1,8*	~0,7

* on a été limité par la hauteur de la rainure de l'actionneur.

Action répétée : réussie
Action permanente : réussie

- Deuxième modèle : « PDMS – PDMS – PDMS »

Le fil ne s'est pas déplacé malgré l'augmentation de la pression appliquée à cause de :

- La force d'adhésion entre les parois de l'actionneur (en PDMS) et le fil de cuivre. Cette force est élevée à cause de la grande largeur de l'actionneur.
- Fuite de pression due à la grande épaisseur de la rainure par rapport au fil.

- Troisième modèle : « Verre – PDMS »

Poids [mN]	3,30	8,40	17,10
Amplitude [mm]	1*	1*	1*

* on a été limité par la hauteur de la rainure de l'actionneur.

Action répétée : réussie
Action permanente : réussie

- Quatrième modèle : « PDMS – PDMS »

Poids [mN]	3,30	8,40	12,30
Amplitude [mm]	1*	1*	1*

* on a été limité par la hauteur du canal de l'actionneur.

Action répétée : réussie
Action permanente : réussie

Les résultats précédents ont permis de prouver la faisabilité d'un micro actionneur par air comprimé. On peut constater que l'actionneur de type « Verre - PDMS - Verre » a donné les meilleurs résultats. Cependant, notre but principal est d'assembler des micros actionneurs sur une seule rangée pour pouvoir commander les filaments de la nappe de chaîne. Pour

cette raison, le type d'actionneur « PDMS - PDMS » a été adopté étant donnée la possibilité de fabriquer une couche mince de PDMS.

3.6.5.5. L'effet des dimensions de l'actionneur et la forme du canal sur

l'efficacité de l'actionneur :

Pour déterminer l'effet de la largeur de l'actionneur, l'effet de la hauteur de la rainure H , et l'influence de la largeur L et la forme du canal de l'air comprimé à l'efficacité de l'actionneur, neuf actionneurs de différentes géométries ont été fabriqués et testés.

La figure suivant donne la forme et les dimensions des actionneurs testés :

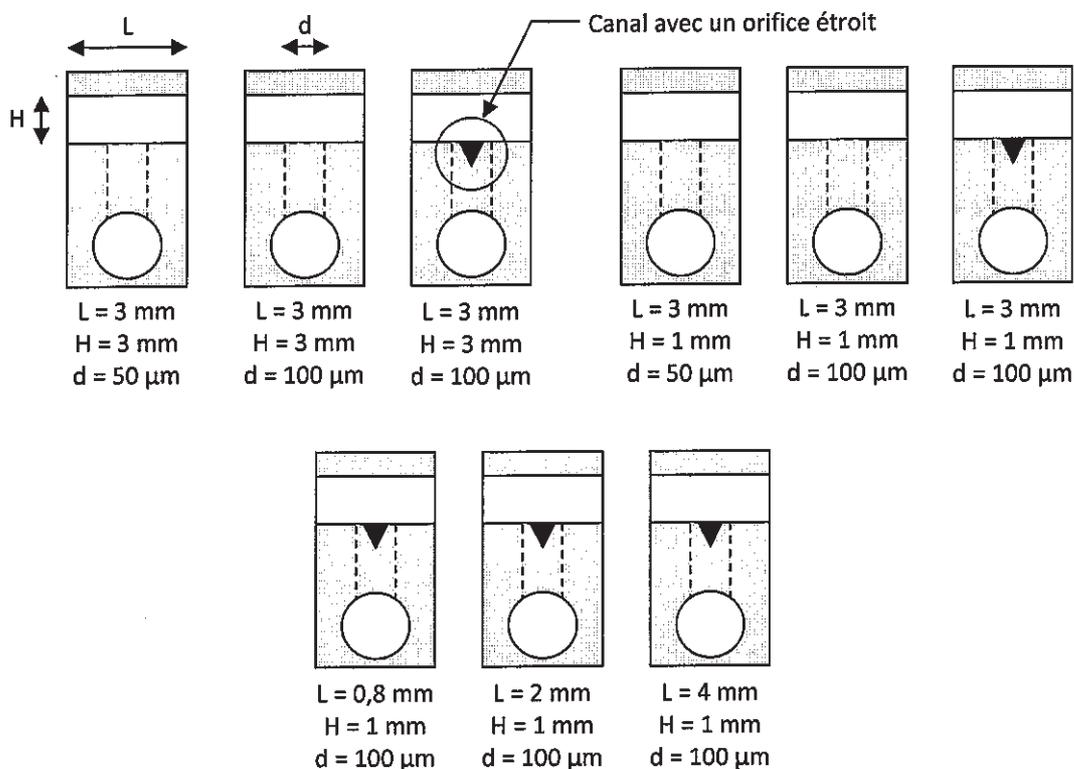


Figure 3-46 : Les différents actionneurs fabriqués

L'actionneur qui a donné les meilleurs résultats est l'actionneur qui a les paramètres suivants : $L = 2$ mm, $H = 1$ mm, $d = 100$ μm avec un canal d'un orifice étroit (la largeur de l'orifice est de 50 μm).

On peut en déduire que l'augmentation de la hauteur de la rainure diminue l'efficacité de l'actionneur. En effet, les parois de la rainure ont tendance à fléchir quand la rainure devient plus haute. L'utilisation d'un canal avec un orifice étroit augmente la force de l'actionneur. La diminution de la largeur de l'actionneur augmente son efficacité car il diminue le frottement entre le filament et les parois de l'actionneur. Cependant, à partir d'une certaine

largeur (1 mm) la force de l'actionneur commence à diminuer car la zone d'application de la pression sur le filament diminue. En fait l'air comprimé peut fuir l'actionneur facilement dans le sens latéral sans appliquer une pression sur le filament.

3.6.5.6. Fabrication d'un bloc de multi actionneurs en seule étape :

Cette méthode consiste à fabriquer une moule avec une série de micro canaux sur un seul substrat de silicium d'une épaisseur élevée de l'ordre de $110\ \mu\text{m}$. une lame de verre d'une épaisseur d'un millimètre sera montée sur le moule fabriqué avant de couler la couche de PDMS (Figure 3-47) et (Figure 3-48, Section théorique).

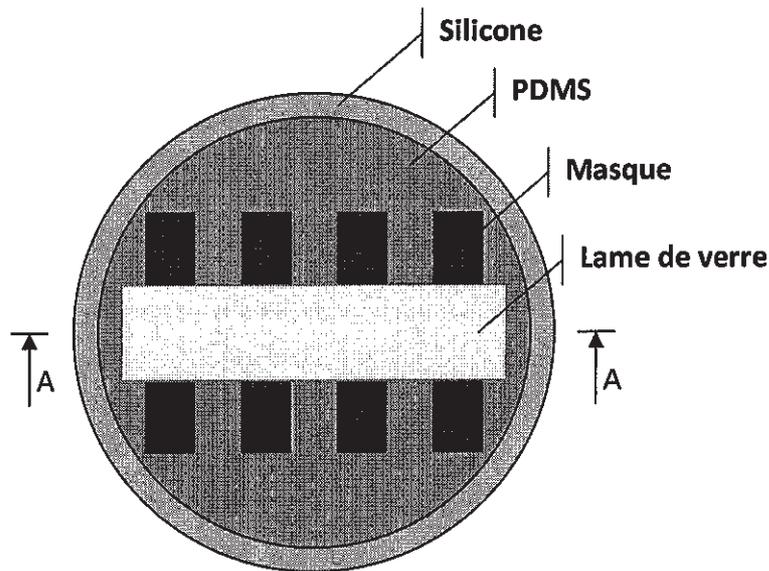


Figure 3-47 : Vue de dessus du moule avec la lame de verre après avoir coulé la couche de PDMS

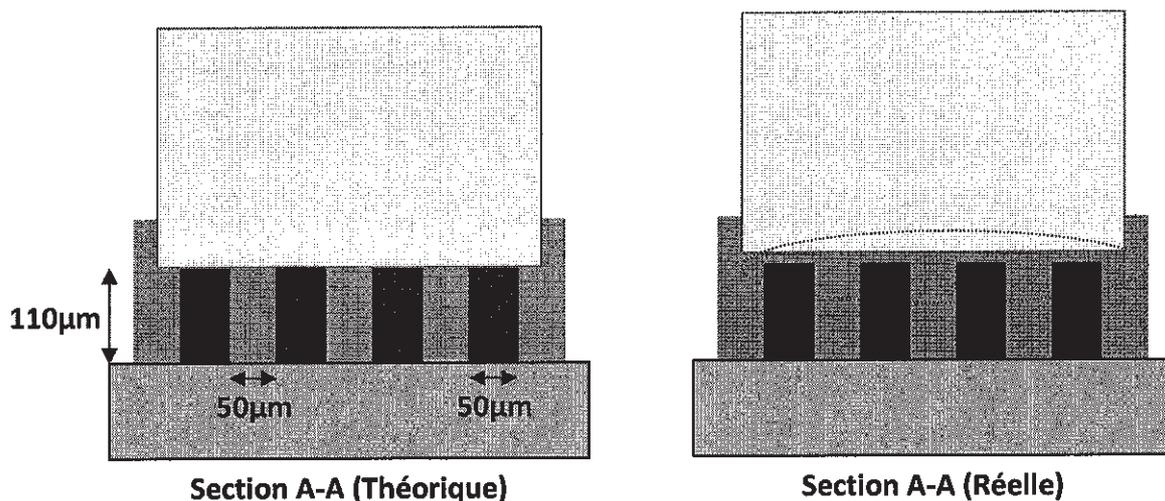


Figure 3-48 : Section A-A dans le moule avec la lame de verre après avoir coulé la couche de PDMS

Après avoir détaché la couche de PDMS, la structure obtenue sera similaire à la structure représentée dans la figure 3-49. Cette couche sera collée avec une couche lisse de PDMS.

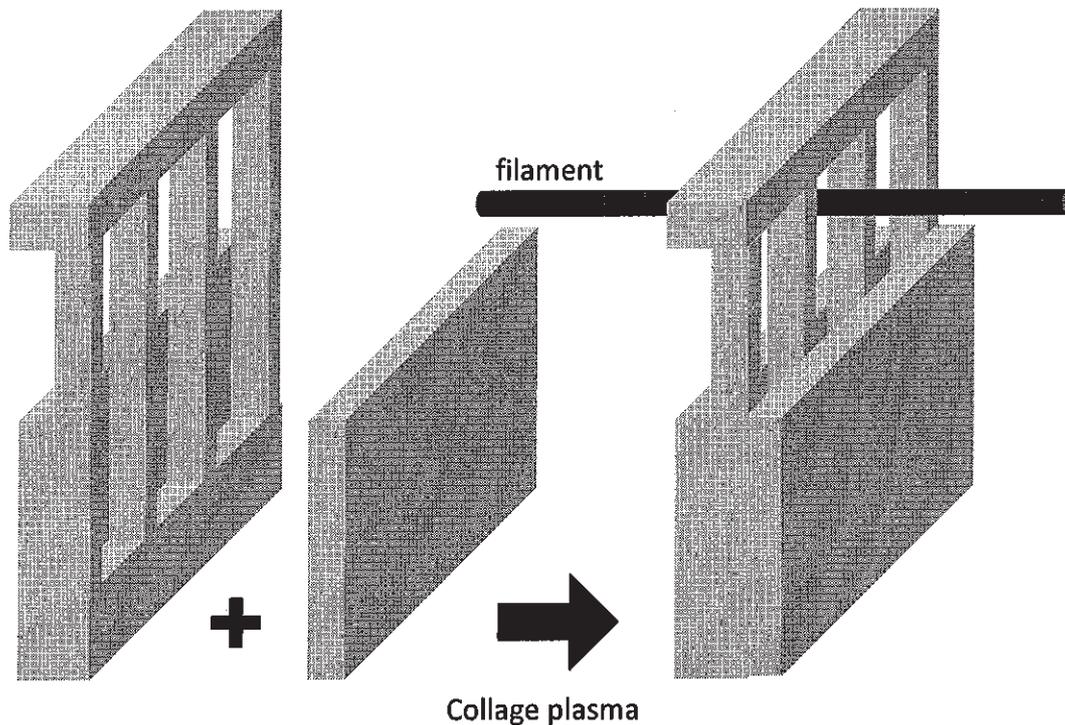


Figure 3-49 : La structure PDMS obtenue (à gauche) et la structure de l'actionneur (à droite)

Cette méthode de fabrication n'a pas abouti à de bons résultats à cause des contraintes suivantes :

- La largeur du canal $110\ \mu\text{m}$ n'est pas suffisante (on n'a pas réussi à fabriquer un masque avec une épaisseur de $225\ \mu\text{m}$).
- Les dents des actionneurs (l'espace où le fil doit passer) sont presque bouchées à cause de mauvais contact entre la lame de verre et le masque (Figure 3-48, Section réelle).

3.6.5.7. Fabrication d'un bloc de multi actionneurs par assemblage :

Cette méthode consiste à fabriquer des micros actionneurs d'une faible épaisseur de l'ordre de $100\ \mu\text{m}$ puis assembler ces actionneurs par collage plasma (Figure 3-54). L'étude bibliographique a montré l'existence des systèmes micro fluidique en multi couches. Micro valve [NAM.01] [HIN.04], micro valve d'un système d'analyse de l'A.D.N. [VAN.05], « lab-on-chip » pour l'analyse de l'A.D.N. [CHO.99], micro pompe [MCD.04]. Les deux méthodes suivantes ont été utilisées pour la fabrication de film mince de PDMS avec des reliefs [RYU.02] [GAO.09] [THA.07] :

1. Fabrication d'un film mince en PDMS en utilisant une lame de verre :

La figure suivante montre les étapes de préparation d'un film mince de PDMS en utilisant une lame de verre de microscope.

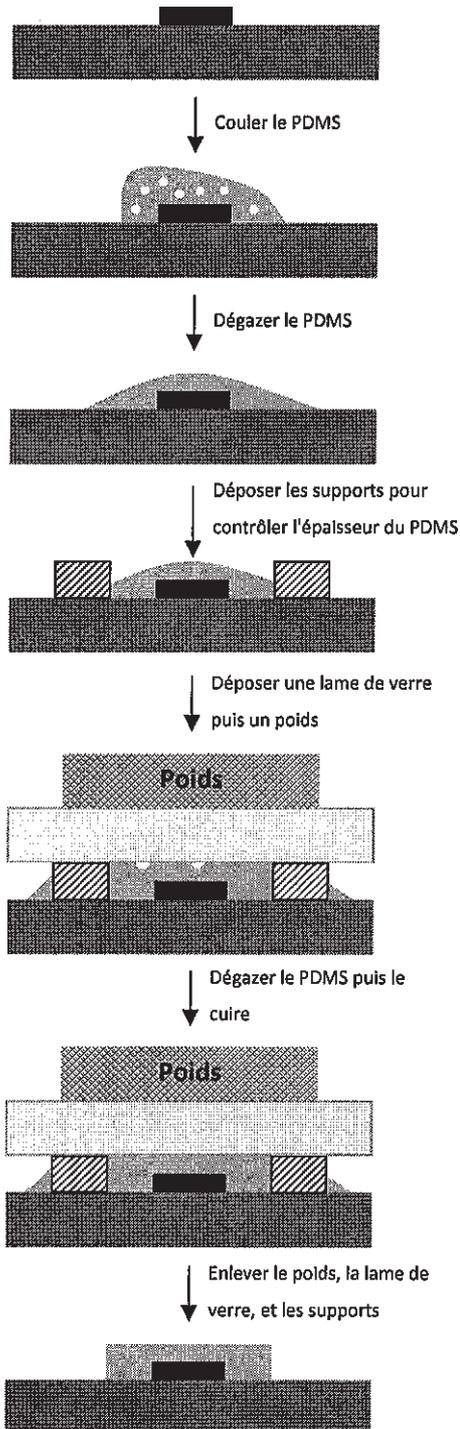


Figure 3-50 : Fabrication d'un film mince en PDMS en utilisant une lame de verre

2. Fabrication d'un film mince en PDMS en utilisant une lame de PMMA :

La figure suivante montre les différentes étapes de cette méthode :

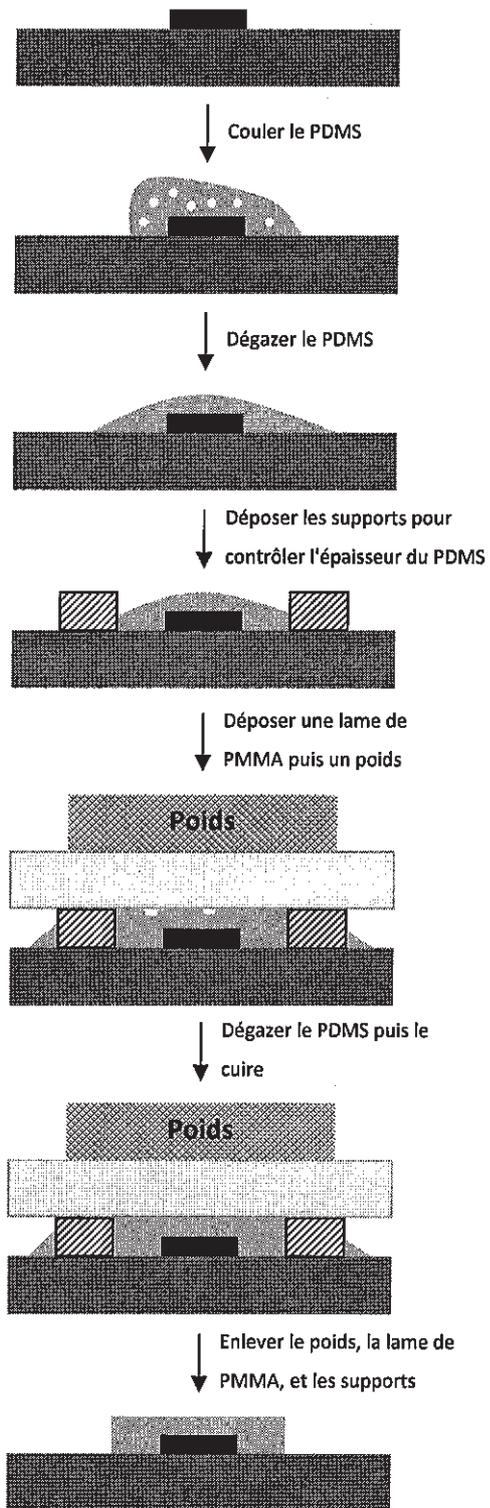


Figure 3-51 : Fabrication d'un film mince en PDMS en utilisant une lame de PMMA

- Avantages :

Les deux méthodes permettent d'avoir un très bon état de surface du film PDMS. Le détachement de la lame de PMMA du film PDMS est plus facile que le détachement de la lame de verre du film PDMS.

- Inconvénients :

Le risque d'avoir des bulles d'air entre la lame de PMMA ou la lame de verre et le PDMS est élevé, même après plusieurs cycles de dégazage.

3. Fabrication d'un film mince en PDMS en utilisant un film en plastique d'épaisseur 100 µm:

La différence entre cette méthode et les deux méthodes précédentes consiste à mettre un film mince en plastique entre la couche de PDMS et la lame de verre ou PMMA.

Après avoir coulé et dégazé une couche fine de PDMS, on applique le film en laissant la tension de surface et la force d'adhésion entre le film et la couche de PDMS de « tirer » le film (Figure 3-52). Cette technique nous permet de déposer le film sur la couche PDMS sans risque d'avoir des bulles d'air prisonnières entre le film et la couche PDMS.

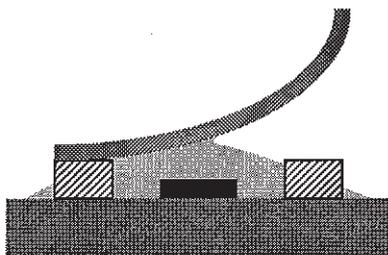


Figure 3-52 : Méthode de dépôt le film

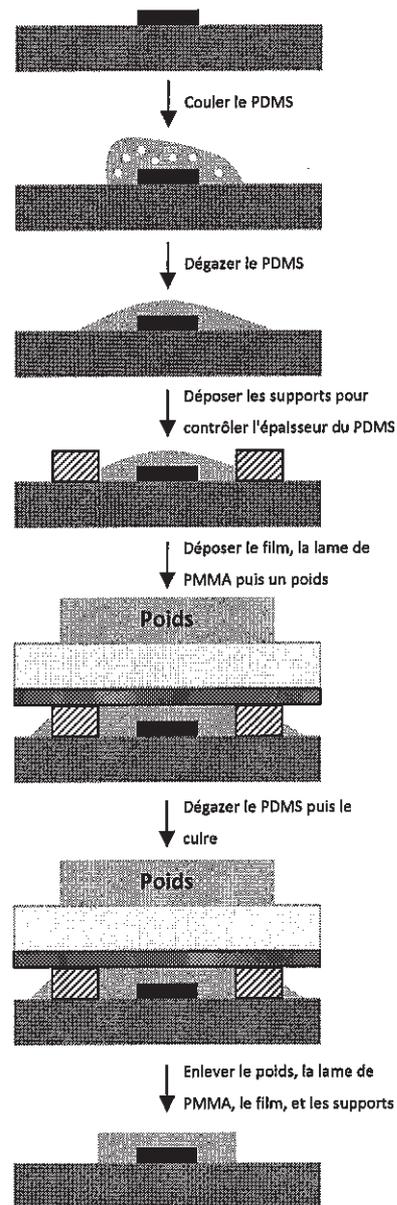


Figure 3-53 : Fabrication d'un film mince en PDMS en utilisant plastique

Problématique de la phase de séparation "la couche mince de PDMS et substrat de silicium" :

Après avoir fabriqué le film mince PDMS, il faut le détacher du substrat de silicium pour pouvoir coller les films PDMS ensemble. L'assemblage des films minces permet de réaliser un bloc de micros actionneurs (Figure 3-54).

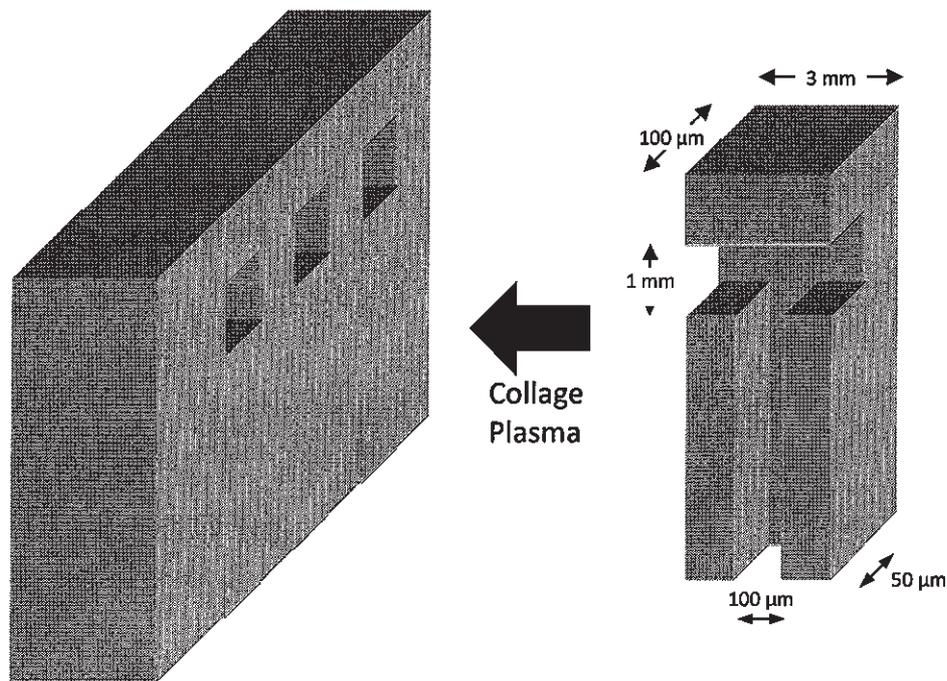


Figure 3-54 : Assemblage des couches minces gravées pour réaliser un bloc de micros actionneurs

Pour détacher le film PDMS du substrat de silicium, deux moyens ont été utilisés :

1. **A l'aide d'un ruban adhésif** : Avant de détacher le film de PDMS du substrat de silicium, un film de ruban adhésif a été collé sur le film de PDMS. Ce ruban empêche la déformation du film de PDMS pendant le détachement et facilite sa manipulation. Cette méthode ne fonctionne plus quand l'épaisseur du film de PDMS est inférieure à $100\ \mu\text{m}$ car la force d'adhésion entre le PDMS et le silicium devient très important par rapport à la rigidité de film de PDMS (risque de déchirer le film PDMS pendant le détachement).

2. **Collage direct** : Avant de détacher le film de PDMS du substrat de silicium, une couche relativement épaisse de PDMS a été collée sur le film de PDMS en utilisant la technique de collage Plasma. Cette couche empêche la déformation du film de PDMS pendant le détachement et facilite sa manipulation. Cette méthode fonctionne même quand l'épaisseur du film de PDMS est inférieure à $100\ \mu\text{m}$.

La deuxième technique semble meilleure car il permet d'assembler la couche du micro actionneur directement avec les autres couches déjà assemblées du bloc de micros actionneurs sans avoir besoin de détacher la couche du micro actionneur du substrat de silicium.

Problématique de contrôler l'épaisseur de film PDMS :

Afin de pouvoir contrôler l'épaisseur de film PDMS, le support qui permet de déterminer l'épaisseur entre le film plastique et le substrat de silicium a été modelé directement sur le substrat de silicium pendant l'étape de fabrication du moule (Figure 3-55). En fait, le moule a été fabriqué avec deux reliefs d'une épaisseur différente. Une couche de SU-8 de 50 μm d'épaisseur posée sur le substrat permet de réaliser le micro canal et le rainure de l'actionneur. Une deuxième couche de SU-8 de 90 μm d'épaisseur posée par la suite sur le substrat de silicium permet de contrôler la distance entre le film et le substrat du silicium et donc de déterminer l'épaisseur du film de PDMS [WU.03] [CAR.04].

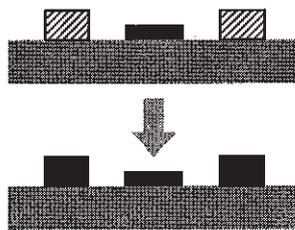


Figure 3-55 : Fabrication d'un moule avec deux reliefs d'une épaisseur différente

Problématique d'alignement des couches minces de PDMS pendant l'assemblage des actionneurs :

Deux méthodes d'alignement ont été utilisées :

1. **A l'aide d'un moule :** Le moule est constitué de deux plaques d'aluminium. Les deux plaques peuvent être assemblées à l'aide d'un guidage de grande précision. Le substrat de silicium est collé sur la plaque inférieure par un film adhésif. Le bloc des micros actionneurs déjà assemblés est posé sur la couche PDMS. L'alignement de la couche de PDMS et le bloc se fait à l'aide d'un microscope optique. La plaque supérieure est collée sur le bloc grâce à un film adhésif double face. Les deux plaques sont séparées et mises dans l'appareil de collage plasma. Après avoir sorti les deux plaques de l'appareil plasma, elles sont montées ensemble. Ceci permet de coller le bloc des micros actionneurs sur la couche PDMS avec une précision de l'ordre de 80 μm .

2. **A l'aide du méthanol :** après avoir sorti la couche mince de PDMS et le bloc des micros actionneurs de l'appareil plasma, une couche de méthanol est mise entre les deux

parties. Cette couche de méthanol joue d'un rôle de surfactant [JO.00]. Les deux parties sont alignées par la suite à l'aide d'un microscope optique. Puis elles sont pressées une contre l'autre et chauffées à 85°C pour évaporer l'éthanol et terminer le processus de collage plasma.

La fabrication de 4 couches minces de PDMS en utilisant un film en plastique, l'alignement à l'aide d'une moule, puis l'assemblage de ces 4 couches par collage plasma directe a permis de fabriquer un bloc de 4 micros actionneurs capable de lever 1 mm le filament de cuivre. L'épaisseur de chaque micro actionneur est de 100 µm.

3.6.5.8. L'alimentation de micro actionneur par l'air comprimé :

Le circuit d'alimentation par l'air comprimé est constitué d'un filtre d'eau, un filtre d'huile, un régulateur de pression et des distributeurs « 2/3 NF » de référence « A00SC232P » [PAR.00]. Chaque distributeur est relié à un micro actionneur et il est piloté par un ordinateur superviseur à l'aide d'une carte de contrôle spécifique. L'ouverture du distributeur permet d'alimenter le micro actionneur par l'air comprimé et donc d'actionner le filament.

3.7. La comman de de la machine à tisser :

Les différentes parties de la machine à tisser doivent synchronisées (Figure 3-56). Une carte de contrôle a été réalisée au sein de notre laboratoire permet de commander les différentes partie de la machine à tisser et les distributeurs de l'air comprimé du bloc de micros actionneurs.

Cette carte est pilotée par un ordinateur superviseur à l'aide d'un logiciel de contrôle. Ce logiciel permet de :

- Piloté la carte de contrôle
- Concevoir directement l'entrecroisement des fils (armure) ou de reprendre les données des logiciels de CAO tissage classique et de les adapter au tissage.

Le logiciel a été programmé en utilisant le langage Visual Basic 6. La figure 3-57 montre la fenêtre principale du logiciel.

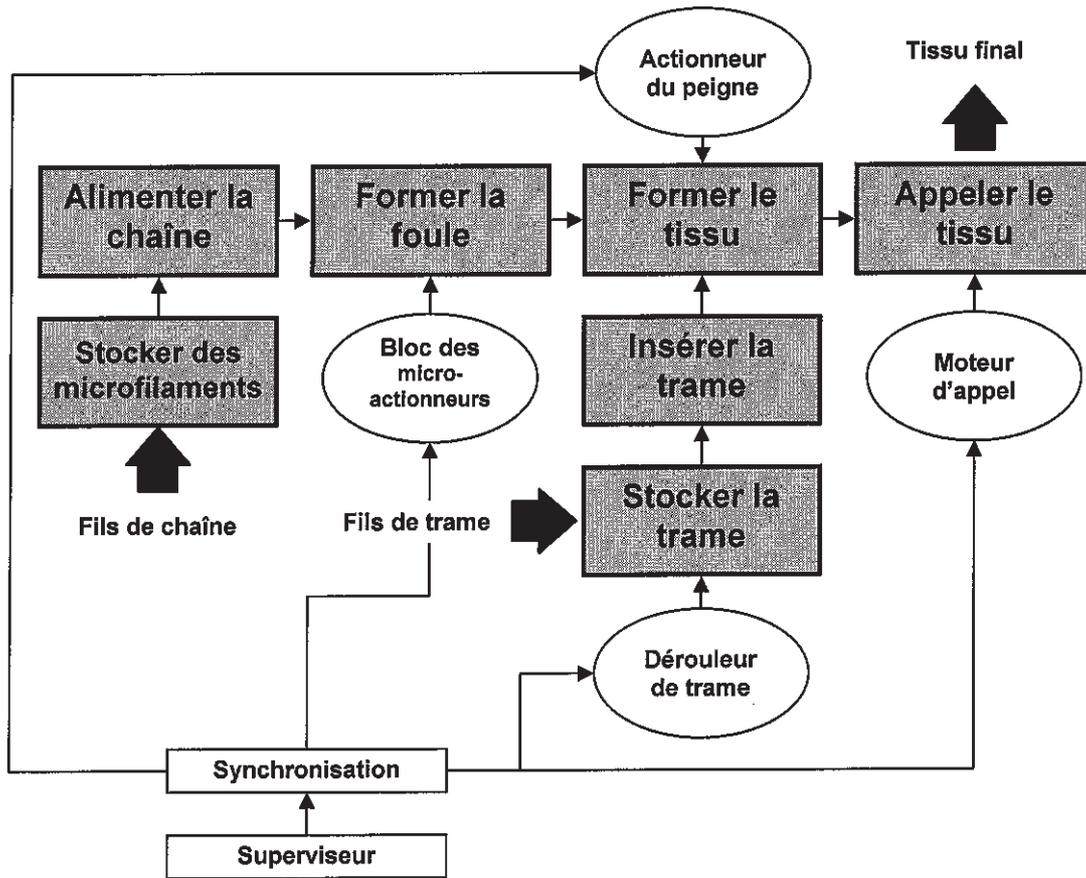


Figure 3-56 : La commande des différentes parties de la machine à tisser

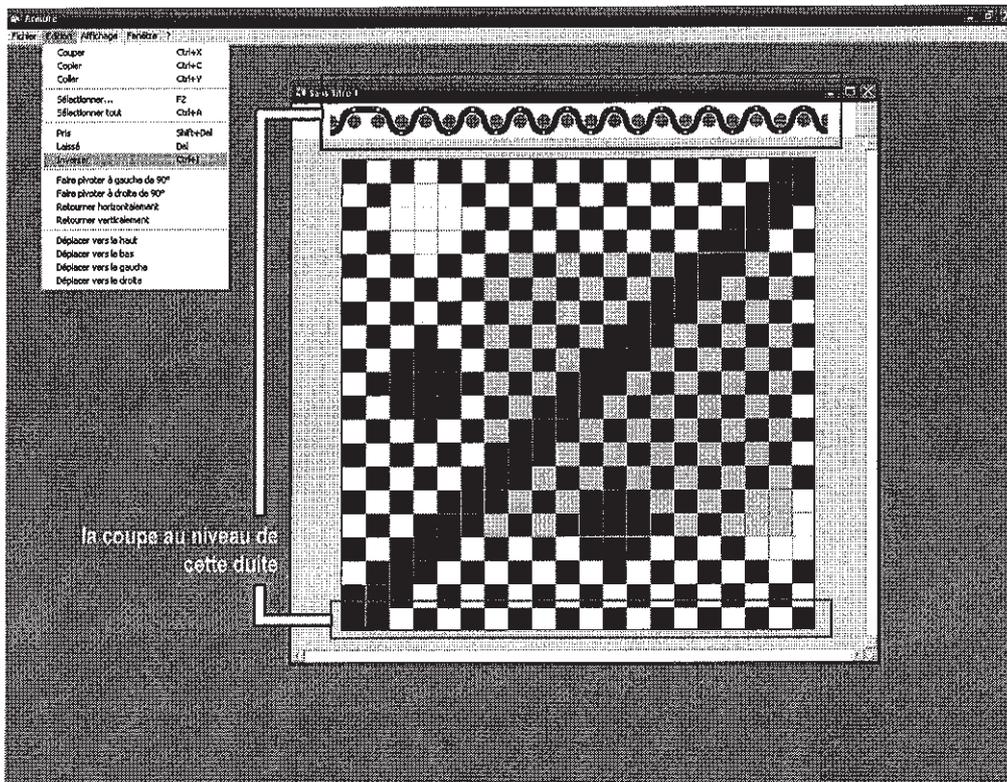


Figure 3-57 : La fenêtre principale du logiciel de dessin d'armure

Le logiciel est facile à utiliser, il permet d'ouvrir plusieurs projets en même temps, de transférer les données, de copier et coller des sélections, insérer des colonnes, montrer et modifier la coupe d'une duite,...

Il permet également de transformer les données du dessin en valeur numérique « octet » (Figure 3-58) pour pouvoir les transmettre à la carte de contrôle via une porte série « RS-232 ».

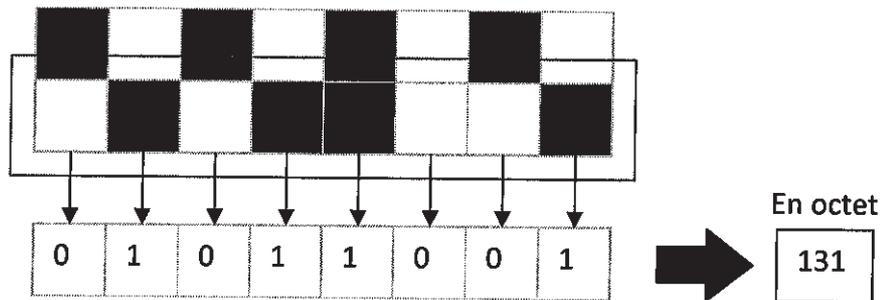


Figure 3-58 : Principe de codage de données d'armure

La carte de contrôle est une carte de sorties numériques (Figure 3-59), elle permet de lire les données envoyées par l'ordinateur et d'activer les portes correspondantes. La carte réalisée peut piloter 128 portes numériques. Elle est constituée d'un micro contrôleur de référence « ATMEL AT90LS8535 » [ATM.00] et des 16 interrupteurs de référence « 74AS573N ». Chaque interrupteur a une adresse physique et 8 portes de sortie. Le micro contrôleur lit la porte série de l'ordinateur et il envoie à chaque interrupteur et selon son adresse un octet de donnée. Le premier octet est envoyé au premier interrupteur pour contrôler ses 8 portes numériques. Le deuxième octet est envoyé au premier interrupteur pour contrôler ses 8 portes numériques et ainsi de suite...

Un bus d'adresse permet d'activer l'interrupteur correspond aux données envoyées à tous les interrupteurs par le bus de donnée.

Un transistor de puissance joue un rôle d'un relais électrique pour pouvoir commander les distributeurs de l'air comprimé et les différentes parties de la machine à tisser. Des lampes lumineuses « LED » est mises à la sortie des portes pour pouvoir vérifier l'état de chaque porte (Figure 3-60).

Le micro contrôleur a été programmé en langage « Basic » à l'aide du compilateur « BASCOM-AVR ».

L'avantage de cette carte qu'il est possible d'augmenter facilement le nombre des portes de sortie en ajoutant des interrupteurs additionnels.

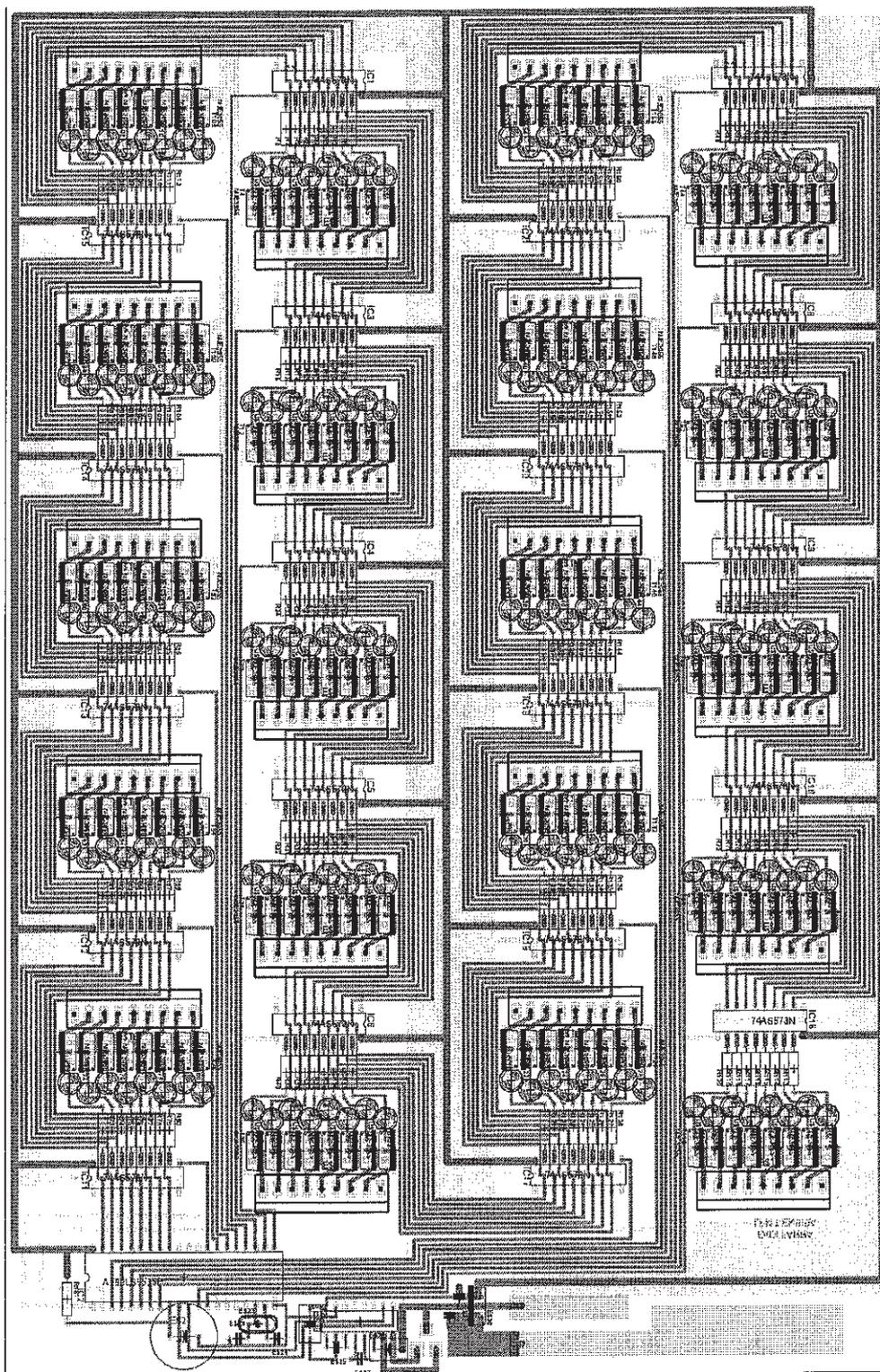


Figure 3-59 : Schéma d'une carte de 160 portes numériques

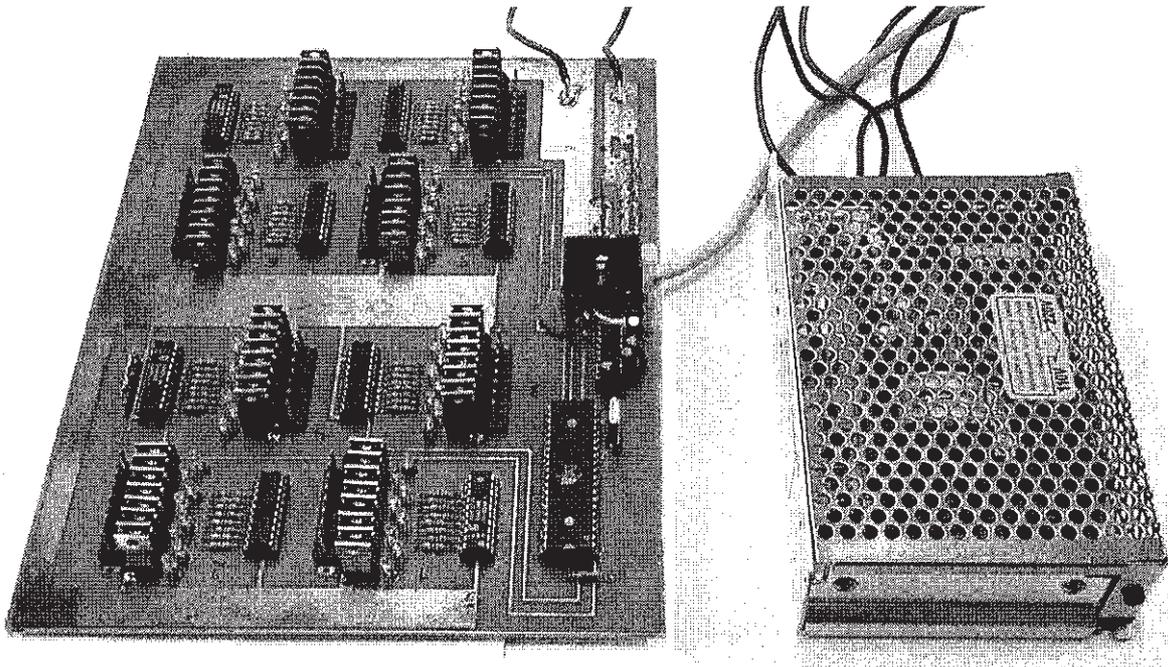


Figure 3-60 : Carte de contrôle fabriquée

Conclusion :

Le point crucial de la machine à tisser, quelle soit classique ou « micro » est la formation de la foule. Cette formation conditionne la faisabilité du tissage. Elle est réalisable dans de bonnes conditions si d'une part les fils de chaîne supportent les contraintes cycliques de l'ouverture et de la fermeture et d'autre part si les fils de chaîne se décroisent correctement. Dans ce chapitre nous avons dans premier temps montrer la tissabilité de filament de cuivre de très faible diamètre ce qui jusqu'à maintenant n'avait pas été démontré.

Dans un deuxième temps le verrou technologique de la formation de la foule pour des filaments de très petit diamètre a été levé.

En effet la conception et la réalisation d'un module « levée de fil » au moyen de la technique de la micro fluidique a montré son efficacité. Ce module ayant été validé, il a donc été possible de construire et de tester des blocs modules de quatre actionneurs. Comme envisagé au chapitre précédent, la technique de « soft lithography » s'est avérée très performante.

Il a été par ailleurs possible de fabriquer différents types de géométrie d'actionneurs et de choisir la plus performante.

Ce verrou ayant été levé, nous avons pu envisager et réaliser les autres fonctions de la machine à tisser en se penchant plus particulièrement sur l'insertion de la trame.

L'utilisation de la technique avec une micro lance de 350 μm de diamètre semble prometteuse.

Le diagramme de la synchronisation est proposé ainsi que sa réalisation au moyen d'une commande électronique.

La commande de la machine étant de type Jacquard, nous proposons aussi le logiciel de réalisation d'armures et de commande des actionneurs.

Conclusions générales

Le but principal de notre étude était de montrer la faisabilité du micro tissage de type Jacquard. Ce but est réalisable par la conception d'une machine capable de tisser des filaments de très faible diamètre (de l'ordre de 10 à 25 μm) et de matières différentes (cuivre, or, polyester...).

Les essais du comportement mécanique (traction, fatigue) du micro filament de cuivre ont montré la possibilité du tissage de ce type du filament à cette échelle.

Les études théoriques dans les chapitres précédents ont permis de montrer l'incapacité des machines à tisser conventionnelles à réaliser le tissage du micro filament. Elles ont permis également d'adapter les différentes parties de la machine à tisser et de proposer des solutions alternatives.

Le calcul de la tension de base théorique nécessaire pour maintenir les filaments de chaîne dans le plan du tissage et le calcul de la tension des filaments lors de l'ouverture de la foule ont permis par la suite de dimensionner les différentes parties de la machine à tisser en particulier les éléments nécessaires à l'ouverture de la foule.

La conception du système d'insertion de la trame permet d'utiliser des filaments de matières et de diamètres différents grâce à la pince de micro chirurgie.

Le système de formation de la foule de type Jacquard représente le cœur de la machine à tisser. Il lève un verrou technologique persistant depuis de très nombreuses années.

L'étude théorique précédente a montré l'incapacité des micros actionneurs piézoélectriques ou électrostatiques, fabriqués actuellement en utilisant les méthodes de micro usinage, à déplacer les filaments de chaîne afin de former la foule.

Les résultats prometteurs des micros actionneurs fluidiques ont permis de montrer la faisabilité du micro tissage et la capacité de ce type d'actionneur à déplacer le filament de cuivre.

Ils ont permis également de valider le procédé de la fabrication d'un bloc des plusieurs actionneurs capable de séparer les filaments de chaîne pour former la foule.

La fabrication du bloc d'actionneurs consiste à coller plusieurs couches de micro actionneur en PDMS.

Chaque micro actionneur est fabriqué à l'aide de la méthode du micro usinage « soft lithographie ». Cette méthode permet de réaliser des micro structures sur une couche mince de PDMS. C'est une méthode facile à appliquer et peu coûteuse. L'utilisation de film plastique pendant la fabrication de couches minces nous a permis d'éviter les problèmes liés à l'existence de bulles d'air dans la structure et de faciliter la séparation entre la couche de PDMS et le film plastique.

Les tests des micros actionneurs de matières, de formes et dimensions différentes ont permis de déterminer les paramètres optimaux de l'actionneur (les dimensions de l'actionneur, la forme et la largeur du canal d'air comprimé) qui permettent d'avoir une efficacité maximale (une force de poussée maximale, une amplitude de mouvement maximale, une épaisseur minimale).

L'étude du comportement mécanique des lentilles de diffraction de la lumière et l'étude des contraintes maximales dans la structure du peigne lors de la frappe de la diode, ont montré la possibilité de réaliser un peigne en suivant les mêmes techniques de fabrication de ces lentilles.

L'avantage de la carte de contrôle conçue est la souplesse de la modification de sa capacité à savoir le nombre de portes numériques.

Le logiciel de contrôle et de dessin conçu possède une interface graphique facile à utiliser. Il permet de réaliser des armures et de dessiner automatiquement les armures les plus classiques enregistrées dans la base de données du logiciel et d'importer des armures réalisées par les autres logiciels de dessin CAO. Il permet également de compiler le dessin dans un format convenable pour pouvoir le transmettre à la carte de contrôle.

En perspective : à court terme, il faut monter et tester le dérouleur de fils de chaîne et le système d'insertion de trame.

Puis il faut réaliser le peigne au moyen de lentilles de diffraction de lumière (avec l'aide des fabricants) ou au moyen de micro usinage LIGA.

Il faut également réaliser le bloc des micro actionneurs dans une matière plus rigide que le PDMS en utilisant les autres techniques de micro usinage pour pouvoir diminuer encore l'épaisseur de chaque micro actionneurs.

Des améliorations du logiciel de dessin d'armure peuvent être apportées, telle que la possibilité de dessiner des armures complexes, la possibilité de simuler l'aspect du tissu final, éliminer les bugs dans le système...

A long terme, une fois la machine à tisser opérationnelle, il faudra essayer de réaliser des tissus de matières différentes et d'armures différentes puis de les caractériser.

Références Bibliographiques

- [ADA.01] Adanur S., *Handbook of weaving*, Technomic Publishing, 2001.
- [ALC.00] Alcon, <http://www.alcon.fr>
- [ATM.00] Atmel, <http://www.atmel.com>
- [AUD.08] Audrey, *Le métier Jacquard : une invention révolutionnaire*, <http://www.gralon.net>, 2008.
- [BEC.82] Becker E.W., Ehrfeld W., Munchmeyer D., Betz H., Heuberger A., Pongratz S., Glashauser W., Michel H.J., *Naturwissenschaften*, 1982, 69, 520-23.
- [BEC.86] Becker E.W., Ehrfeld W., Hagmann P., Maner A., Muchmeyer D., *Microelectron. Eng.*, 1986, 4, 35.
- [BEN.06] Ben Hassan M., *Cours de préparation au tissage*, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Kasr Hellal, 2006.
- [BER.96] Berre M.L., Kleinmann P., Semmache B., Barbier D., Pinard P., *Journal of Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, 54, 700-703.
- [BLA.07] Blake A. J., Pearce T. M., Rao N. S., Johnson S. M., Williams J. C., *Lab on a Chip*, 2007, 7, 842-849.
- [BUN.71] Bunsell A. R., Hearle J. W. S., Hunter R. D., *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 4, 1971, 868-872.
- [CAR.04] Carlier J., Arscott S., Thomy V., Fourrier J. C., Caron F., Camart J. C., Druon C., Tabourier P., *Journal of Micromech. Microeng.*, 2004, 14, 619-624.
- [CCM.00] DE-STA-CO, <http://www.destaco.com>
- [CHO.07] Chou H., Unger M. A., Scherer A., Quake S. R., *CiteSeerX - Scientific Literature Digital Library*, 2007, 43321565.
- [COL.08] <http://www.eetimes.com/news/latest/showArticle.jhtml?articleID=207100311>
- [CUI.00] Centre d'Information du Cuivre, <http://www.cuivre.org>
- [DEN.77] Den Hartog J.P., *Strength of materials*, Dover Publications, 1977.
- [DOM.04] Dominique F., *Endommagements et rupture de matériaux*, EDP Sciences, 2004.
- [DRE.00] Drean J. Y., *Cours de tissage*, Université de Haute Alsace, 2000.
- [DUF.99] Duffy D. C., McDonald J. C., Schueller O.J., Whitesides G. M., *Journal of Micromech. Microeng.*, 1999, 9, 211-217.
- [DUR.57] Durant W., *The Reformation: A History of European Civilization from Wyclif to Calvin*, MJF Books, 1957.

- [EFF.95] Effenhauser C. S., Manz A., Widmer H. M., *Analytical Chemistry*, 1995, 67, 2284.
- [ELE.00] Emsdiasum, <http://www.emsdiasum.com>
- [GAO.09] Gao H., Xu K., Chen B., Wu L., Tung C., Ji H., *Journal of Nanotechnology*, 9, 2009, 709748.
- [GEU.00] Geuder, <http://www.geuder.de>
- [GRE.95] Greek S., Ericson F., Johansson S., Schweitz J.-Å., *8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm*, 1195, 56-59.
- [GUE.04] Guehama Z., *Thèse, Université de Haute Alsace*, 2004.
- [HIN.04] Hilner E., Stefanou S., *Cours, Nanobiotechnology group., Lund University*, 2004.
- [HOW.82] Howe R.T., Muller R.S., *Journal of Applied Physics*, 1982, 54, 4674-75.
- [HOW.83] Howe R.T., Muller R.S., *Journal of The Electrochemical Society: Solid-State Sci. Technol.*, 1983, 130(6), 1420-1423.
- [IKO.00] IKO Nippon Tompson, <http://www.ikont.co.jp>
- [IMM.00] IMM, <http://www.imm-mainz.de>
- [JIA.03] Jiana L., Loechela B., Scheunemanna H.-U., Bednarzika M., Destab Y. M., Goettert J., *International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems*, 2003.
- [JO.00] Jo B.-H., Van Lerberghe L.M., Motsegood K.M., Beebe, D.J., *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9, 76-81.
- [KAM.98] Kamins T., *Polycrystalline Silicon for Integrated Circuits and Displays, Kluwer Academic*, 1998.
- [KER.78] Kern W., Deckert C.A., *Academic Press, Orlando*, 1978.
- [KIT.76] Kittel C., *Introduction to Solid State Physics, Wiley*, 1976.
- [KLO.04] Kloter U., Schmid H., Wolf H., Michel B., Juncker D., *Micro Electro Mechanical Systems*, 2004, 745- 748.
- [LAM.48] Lambrette A., *Tout le tissage, Les Editions Textile et Technique, Tome IV*, 1948.
- [LAM.92] Lambrechts M., Sansen W., *Biosensors: Microelectrochemical Devices, Institute of Physics Publishing*, 1992.
- [LAN.96] Lange P., Kirsten M., Riethmuller W., Wenk B., Zwicker G., Morante J.R., Ericson F., Schweitz J.A., *Sensors and Actuators*, 1996, 54, 674-78.
- [LAW.89] Lawes R.A., *Applied Surface Science*, 1989, 36, 485-99.
- [LEC.03] Leclerc E., Sakai Y., Fujii T., *Micro Electro Mechanical Systems*, 2003, 415- 418.

- [LEC.06] Le Clerc C., *Thèse, Ecole des Mines de Paris, 2006.*
- [LIN.00] http://www.linternaute.com/histoire/categorie/evenement/98/1/a/51081/invention_du_transistor
- [LOR.82] Lord P. R., Mohamed M. H., *Weaving : Conversion of yarn to fabric, Merrow Technique Library, 1982.*
- [MAG.00] Magnetic Sensor Systems, <http://www.magneticsensorsystems.com>
- [MAR.76] Marks R., Robinson A. T. C., *Principles of weaving, The Textile institute, 1976.*
- [MCD.04] McDonald S., Pan T., Ziaie B., *Engineering in Medicine and Biology Society, 2004, 1, 2650-2653.*
- [MEM.03] MEMS not so small after all, *Micro Nano, 2003, 8, 6.*
- [MOH.88] Mohr J., Ehrfeld W., Munchmeyer D., *Journal of Vacuum Science and Technology, 1988, B6, 2264-67.*
- [MON.92] Monk D.J., Soane D.S., Howe R.T., *Conf. Smart Materials Fabrication and Materials for Micro-Electro-Mechanical Systems, San Francisco, 1992, 303-10.*
- [MUR.73] Muraoka H., Ohashi T., Sumitomo T., *Electrochemical Soc. Softbound Symposium Series, Pinceton, 1973, NJ, 327-38.*
- [MUR.93] Murdock J. W., *Fundamental Fluid Mechanics for the Practicing Engineer, CRC, 1993.*
- [NAM.01] Namasivayam V., Liu R., Towe B., Grodzinski P., *The 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Munich, Germany, 2001.*
- [NAT.00] NAI, <http://www.nationalaperture.com>
- [NAT.67] Nathanson H.C., Newell W.E., Wickstrom R.A., Davis J.R., *IEEE Trans. Electron Devices, 1967, ED-14, 117-133.*
- [OSS.01] Osselin J. F., *Thèse, Université de Haute Alsace, 2001.*
- [PAR.00] Parker Hannifin, <http://www.parker.com>
- [PIE.00] PIEZO SYSTEMS, <http://www.piezo.com>
- [PUE.91] Puers R., "Mechanical silicon sensors at K.U. Leuven", *Conf. Proc. Thermadag: SENSOREN, Rotterdam, Netherlands, 1991, 1-8.*
- [ROB.59] Robbins H., Schwartz B., *Journal of The Electrochemical Society, 1959, 106, 505-8.*
- [ROB.60] Robbins H., Schwartz B., *Journal of The Electrochemical Society, 1959, 107, 108-11.*
- [ROS.77] Rosler R.S., *Solid State Technology, 1977, 20, 63-70.*
- [RYU.02] Ryu K. S., Liu C., *Micro Total Analysis Systems, 1, 2002, 112-114.*

- [SCH.00] SCHUNK, <http://www.schunk.com>
- [SCI.00] <http://science-for-everyone.over-blog.com/article-13559558.html>
- [SD1.77] South California Department of Education, *Textile Processing, Volume 1, 1977.*
- [SD2.77] South California Department of Education, *Textile Processing, Volume 2, 1977.*
- [SEL.00] Selectronic, <http://www.selectronic.fr>
- [SHU.07] Shujie X., Yugang D., Yucheng D., *Journal of Mechanical Engineering of China, 2007, 6.*
- [SMC.00] SMC, <http://www.smc.eu>
- [SMI.54] Smith C.S., *Physical Review, 1954, 94(1), 42-49.*
- [SPI.76] Spiller E., Feder R., Topalian J., Castellani E., Romankiw L., Heritage M., *Journal of Solid State Technology, 1976, 62-68.*
- [STE.05] Steinert C.P., Schmitt N., Deier E., Daub M., deHeij B., Zengerle R., *Micro Electro Mechanical Systems, 2005, 552- 555.*
- [TAN.89] Tang W.C., Nguyen T.-C.H., Howe, R.T., *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, 1989, 187 93.*
- [THA.07] Thangawng A. L., Ruoff R. S., Swartz M. A., Glucksberg M. R., *Biomedical Microdevices, 2007, 9, 587-595.*
- [TOU.00] Tour Eiffel, <http://www.tour-eiffel.fr>
- [TRI.89] Trimmer W.S.N.T., *Micromechanics and MEMS: Classic and Seminal Papers, 1989, 96 116.*
- [VAN.05] Van Noort D., Zhang B., *Biomedical Applications of Micro- and Nanoengineering, 2005, 5651, 214-220.*
- [WIK.00] Wikipedia, http://fr.wikipedia.org/wiki/Pyramide_de_Kheops
- [WIK.01] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law
- [WIL.96] Williams K.R., Muller R.S., *Journal of The Electrochemical Society, 1996, 137, 3612-32.*
- [WOO.95] Woolley A. T., Mathies R. A., *Analytical Chemistry, 1995, 67, 3676.*
- [WU.03] Wu H., Odom T. W., Chiu D. T., Whitesides G.M., *Journal of the American Chemical Society, 2003, 125, 554-559.*
- [XIA.98] Xia Y., Whitesides G. M., *Angewandte Chemie International Edition, 1998, 37,550-575.*
- [YUN.92] Yun W., Thèse, *University of California, 1992.*

Liste des figures

Figure 1-1 : Les fils de chaîne et les fils de trame [LOR.82]	6
Figure 1-2 : Le principe du tissage [LOR.82]	6
Figure 1-3 : Le principe de la machine à tisser [ADA.01]	7
Figure 1-5 : Armure de rapport de 5.....	9
Figure 1-6 : Armure complexe [ADA.01].....	9
Figure 1-7 : L'armure toile, l'image du tissu est prise de [SD1.77].....	10
Figure 1-8 : L'armure Sergé 4 effet chaîne, l'image du tissu est prise de [SD1.77].....	11
Figure 1-9 : L'armure satin 5 effet chaîne d=3, l'image du tissu est prise de [SD1.77].....	11
Figure 1-10 : Les armures dérivées.....	12
Figure 1-11 : Les armures composées	13
Figure 1-12 : Tissu double face	13
Figure 1-13 : A – Le tissu tubulaire, B – Le tissu à double largeur.....	14
Figure 1-14 : Le tissu poche	14
Figure 1-15 : A – Cops de filature, B – Bobine [LOR.82]	17
Figure 1-16 : A – faiblesse, B – grosseur, C – nep, D – poil [LOR.82].....	17
Figure 1-17 : Schéma du processus de bobinage [ADA.01].....	18
Figure 1-18 : Ourdissoir [SD1.77].....	19
Figure 1-19 : Schéma du processus d'encollage [LOR.82]	20
Figure 1-20 : Schéma du processus de rentrage [ADA.01]	20
Figure 1-21 : Schéma du régulateur négatif [MAR.76]	22
Figure 1-22 : Schéma du régulateur semi-positif.....	23
Figure 1-23 : Schéma du régulateur positif	23
Figure 1-24 : Les types des lamelles [MAR.76]	24
Figure 1-25 : La casse chaîne mécanique [MAR.76]	25
Figure 1-26 : La casse chaîne électrique [MAR.76].....	25
Figure 1-27 : Les différentes géométries de la foule	26
Figure 1-28 : Dispositif de formation la foule à cames négatifs [ADA.01].....	28
Figure 1-29 : Dispositif de formation la foule à cames positifs [ADA.01].....	28
Figure 1-30 : Dispositif de formation la foule à double cames [ADA.01]	29
Figure 1-31 : Principe de la ratière négative [ADA.01]	30
Figure 1-32 : Les différentes positions des couteaux [LOR.82]	30
Figure 1-33 : Principe de la ratière positive [ADA.01]	32

Figure 1-34 : Principe de la mécanique Jacquard STAUBLI [ADA.01]	33
Figure 1-35 : Les différents principes d'insertion [ADA.01] et [LOR.82].....	35
Figure 1-36 : La canette montée sur la navette [ADA.01]	36
Figure 1-37 : Le projectile [ADA.01].....	37
Figure 1-38 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à projectile type Sulzer	38
Figure 1-39 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à lance de type Gabler .	39
Figure 1-40 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à lance de type Dewas	40
Figure 1-41 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à jet d'eau	42
Figure 1-42 : Cycle d'insertion de fil de trame sur une machine à tisser à jet d'air	43
Figure 1-43 : Dispositif de mouvement du peigne [LOR.82].....	44
Figure 1-44 : Types de pas [ADA.01].....	44
Figure 1-45 : A – Peigne profilé, B – Peigne Normal [ADA.01]	45
Figure 1-46 : Les principes d'enrouleur	46
Figure 1-47 : A – Papier ou film mince, B – Tissu [LOR.82].....	47
Figure 1-48 : L'utilisation du tissu technique [ADA.01]	48
Figure 2-1 : Ordre de grandeur de différents objets [SCI.00]	51
Figure 2-2 : L'augmentation de nombre des transistors dans un circuit intégré en fonction du temps [WIK.01]	52
Figure 2-3 : La différence entre gravure isotrope et gravure anisotrope.....	58
Figure 2-4 : Principe de gravure isotrope humide du substrat de silicium.....	60
Figure 2-5 : Principe de gravure anisotrope humide avec un contrôle de la profondeur de gravure .	62
Figure 2-6 : Principe de micro usinage surfacique.....	64
Figure 2-7 : La fabrication de la couche de base du masque.....	66
Figure 2-8 : Principe de la méthode du micro usinage LIGA.....	67
Figure 2-9 : Orifices de filage [IMM.00]	69
Figure 2-10 : Déformation de PDMS après le moulage [XIA.98]	70
Figure 2-11 : Principe de la méthode de micro fabrication « soft lithographie »	71
Figure 3-1 : L'évolution de la tension de fils de chaîne en fonction de l'angle de rotation de l'arbre du moteur de la machine à tisser [LOR.82].....	76
Figure 3-2 : Le schéma du fil tendu.....	77
Figure 3-3 : Schéma de la foule.....	79
Figure 3-4 : Machine « UFT »	81

Figure 3-5 : L'éprouvette recouverte du papier adhésif à ses deux extrémités.....	83
Figure 3-6 : Courbe contrainte-déformation du filament de cuivre.....	83
Figure 3-7 : Contraintes répétées	85
Figure 3-8 : L'évolution de nombre de cycles en fonction de la contrainte maximale	85
Figure 3-9 : Photo MEB du facies de rupture en fatigue avec $\sigma_{\max}= 240$ MPa.....	86
Figure 3-10 : Photo MEB du facies de rupture en fatigue avec $\sigma_{\max}= 160$ MPa.....	86
Figure 3-11 : Schéma du régulateur négatif	87
Figure 3-12 : Schéma de la préparation de la nappe de fils de chaîne.....	89
Figure 3-13 : Lentille avec une grille de trous hexagonaux	90
Figure 3-14 : Schéma du dispositif d'alimentation par un cantre de bobines.....	90
Figure 3-15 : Glissière miniature de précision	91
Figure 3-16 : Actionneur pneumatique.....	92
Figure 3-17 : Actionneur à entraînement électromagnétique avec son unité de pilotage.....	92
Figure 3-18 : Pince pneumatique.....	92
Figure 3-19 : Schéma du principe d'insertion à lance tubulaire.....	93
Figure 3-20 : Pince de micro chirurgie montée sur une poignée [ALC.00].....	94
Figure 3-21 : Schéma du principe d'insertion à lance avec une pince positive.....	96
Figure 3-22 : Lentille avec une grille avec des barres parallèles.....	97
Figure 3-23 : Schéma d'une poutre encastree à ses deux extrémités et diagrammes des moments fléchissant.....	98
Figure 3-24 : Table motorisée de précision	100
Figure 3-25 : Schéma de dispositif d'enroulement du tissu	100
Figure 3-26 : Schéma de foule ouverte.....	102
Figure 3-27 : La force nécessaire pour lever un filament en fonction de la hauteur de la foule	103
Figure 3-28 : Principe de mécanique Jacquard « première idée »	105
Figure 3-29 : Dispositif de formation de la foule par action directe	106
Figure 3-30 : Actionneur de flexion, A – connexion en série, B – connexion parallèle [PIE.00].....	107
Figure 3-31 : Bloc des doigts poussoirs.....	108
Figure 3-32 : Principe de sélection (vue de dessus).....	108
Figure 3-33 : Sélection par un bloc des actionneurs de flexion transversal.....	109
Figure 3-34 : Sélection par un bloc des actionneurs de flexion.....	110
Figure 3-35 : Sélection par un bloc d'actionneurs de flexion à l'aide du peigne.....	110

Figure 3-36 : Dispositif de formation de la foule par sélection à l'aide d'une pince.....	111
Figure 3-37 : principe de fonctionnement du Dispositif de formation de la foule par sélection à l'aide d'une pince	112
Figure 3-38 : Principe de micro-actionneurs par air comprimé.....	113
Figure 3-39 : Principe de fabrication de micro structure gravée dans une couche en PDMS.....	113
Figure 3-40 : Schéma d'un actionneur (Verre – PDMS – Verre)	114
Figure 3-41 : Schéma d'un actionneur (PDMS – PDMS – PDMS).....	115
Figure 3-42 : Moule.....	116
Figure 3-43 : Schéma d'un actionneur (PDMS – VERRE)	116
Figure 3-44 : Schéma d'un actionneur (PDMS – PDMS)	117
Figure 3-45 : Plateau de mesure	117
Figure 3-46 : Les différents actionneurs fabriqués	119
Figure 3-47 : Vue de dessus du moule avec la lame de verre après avoir coulé la couche de PDMS ..	120
Figure 3-48 : Section A-A dans le moule avec la lame de verre après avoir coulé la couche de PDMS ...	120
Figure 3-49 : La structure PDMS obtenue (à gauche) et la structure de l'actionneur (à droite)....	121
Figure 3-50 : Fabrication d'un film mince en PDMS en utilisant une lame de verre.....	122
Figure 3-51 : Fabrication d'un film mince en PDMS en utilisant une lame de PMMA	122
Figure 3-52 : Méthode de dépôt le film.....	123
Figure 3-53 : Fabrication d'un film mince en PDMS en utilisant plastique	123
Figure 3-54 : Assemblage des couches minces gravées pour réaliser un bloc de micros actionneurs	124
Figure 3-55 : Fabrication d'une moule avec deux reliefs d'une épaisseur différente.....	125
Figure 3-56 : La commande des différentes parties de la machine à tisser	127
Figure 3-57 : La fenêtre principale du logiciel de dessin d'armure	127
Figure 3-58 : Principe de codage de données d'armure.....	128
Figure 3-59 : Schéma d'une carte de 160 portes numériques	129
Figure 3-60 : Carte de contrôle fabriquée	130