

N° d'ordre : 2218

* 50376
1998
365

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR

en Productique : Automatique et Informatique Industrielle

par :

FATEN FAYALA

**CONTRIBUTION A LA MODELISATION GEOMETRIQUE
D'UNE STRUCTURE MULTIFILAMENTAIRE :
APPLICATION AU MOUILLAGE CAPILLAIRE**

Soutenue publiquement le 02 Février 1998 devant la commission d'examen :

MM.

C. VASSEUR	Président et directeur de recherche
M. BEN JELLOUN	Rapporteur
A. CRESPIY	Rapporteur
C. CAZE	Examineur
M. RAMMAH	Examineur
A. PERWUELZ	Examinatrice
X. ZENG	Codirecteur

SCD LILLE 1



D 030 258869 8

à mes Parents,

à mon mari,

à mon frère et ma sœur,

Aux familles :

FAYALA, OVERTANI, GHITH et SFAXI

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire GEMTEX de l'ENSAIT de Roubaix en collaboration avec le laboratoire I3D de l'université des sciences et technologie de Lille.

Je tiens, tout d'abord, à remercier Monsieur le Professeur Christian VASSEUR, Directeur du laboratoire I3D pour avoir accepté de diriger mes recherches et de présider le jury d'examen de ma thèse. Je tiens à lui exprimer ma grande reconnaissance à travers ces lignes pour son enthousiasme, sa patience et ses conseils.

Je remercie profondément Messieurs les Professeurs Mohamed BEN JELLOUN et Alain CRESPIY pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mes travaux, malgré leurs nombreuses activités.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur le Professeur Claude CAZE pour l'intérêt qu'il a porté pour la réalisation de ce travail ainsi que pour avoir accepté d'être membre de mon jury.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur Mohamed RAMMAH, Directeur de l'ENIM (TUNISIE), pour la confiance, les encouragements qu'il m'a fait et pour avoir accepté d'être membre de mon jury malgré ses nombreuses charges administratives et activités scientifiques.

Je remercie également Madame Anne PERWUELZ, Maître de conférences à l'ENSAIT de Roubaix, pour les conseils qu'elle a apporté tout au long de cette étude et pour avoir accepté de juger ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma grande reconnaissance à Monsieur Xianyi ZENG, Maître de conférences à l'ENSAIT de Roubaix pour l'encadrement de mes travaux de recherches, sa patience, sa rigueur scientifique et ses conseils.

Enfin, je remercie vivement toutes les personnes qui m'ont aidée et encouragée dans mes travaux, qu'elles soient collègues, personnels du laboratoire GEMTEX ou Enseignants.



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	5
CHAPITRE I : CONTEXTE DE L'ETUDE (études effectuées sur le fil)	9
I-1 / LOIS D'ECOULEMENTS DANS LES MILIEUX POREUX	11
I-1-1 / Définition d'un milieu poreux	11
I-1-2 / Porosité	11
I-1-3 / Etude de l'écoulement	12
I-2 / MODELISATION GEOMETRIQUE DU FIL	13
I-3 / MODELISATION MECANIQUE	14
I-4 / MODELISATION PAR SEQUENCES D'IMAGES	14
I-5 / CONCLUSION	15
CHAPITRE II : CARACTERISATION DES COUPES DE FIL	17
II-1 / PREPARATION DES COUPES	18
II-1-1 / Imprégnation du fil (importance des interstices)	18
II-1-2 / Processus de fabrication du fil PET (polyéthylène thérephalate)	19
II-1-3 / Préparation du fil pour les coupes transversales	20
II-1-3-1 / Présentation	20
II-1-3-2 / Préparation de l'échantillon	21
II-1-3-3 / Obtention des coupes	22

II-2 / ACQUISITION DES IMAGES DES COUPES	23
II-2-1 / Matériel d'acquisition	23
II-2-2 / Binarisation des images	24
II-2-3 / Recherche des centres des monofilaments (méthode de la boule)	26
II-2-3-1 / Principe de la méthode	26
II-2-3-2 / Méthode de la boule	27
II-2-3-3 / Moyenne des centres	30
II-2-4 / Superposition des coupes	31
II-2-4-1 / Méthode basée sur la superposition des monofilaments	32
II-2-4-2 / Méthode du polygone	33
II-3 / SUIVI D'UN INTERSTICE D'UNE COUPE A UNE AUTRE	36
II-3-1 / Recherche des interstices	37
II-3-1-1 / 1 ^{ère} Méthode de recherche	37
II-3-1-2 / 2 ^{ème} Méthode (Méthode de la boule topologique)	40
II-3-1-3 / Caractéristiques d'un interstice	47
II-3-2 / Suivi d'un interstice d'une coupe à une autre	48
II-3-2-1 / Différents cas d'évolutions	48
II-3-2-2 / Algorithme de suivi	48
II-4 / CONCLUSION	52
CHAPITRE III : ASCENSION CAPILLAIRE	54
III-1 / NOTIONS THEORIQUES	55
III-1-1 / Ecoulement de Poiseuille	56
III-1-1-1 / Equation du mouvement	56
III-1-1-2 / Calcul du débit	59
III-1-1-3 / Calcul de la vitesse maximale et de la vitesse moyenne	59
III-1-2 / Equation de Lucas-Washburn	61

III-2 / METHODE EXPERIMENTALE	63
III-2-1 / Dispositif de mesure de l'ascension capillaire	63
III-2-2 / Mesure de la hauteur atteinte par le liquide	65
III-2-2-1 / Principe de mesure	65
III-2-2-2 / Mesures effectuées	66
III-3 / CONCLUSION	70
CHAPITRE IV : MODELISATION DE LA STRUCTURE GEOMETRIQUE DU FIL	72
IV-1 / RAPPELS SUR LA LOGIQUE FLOUE	74
IV-1-1 / Introduction	74
IV-1-2 / Caractéristiques à la logique floue	75
IV-1-3 / Conditions et domaines d'utilisation	76
IV-1-4 / Principe du contrôleur de logique floue	77
IV-1-4-1 / Définitions	77
IV-1-4-2 / Méthode de raisonnement en logique floue	79
IV-1-5 / Principales méthodes	81
IV-1-6 / Méthode utilisée (Sugeno)	82
IV-2 / DEFINITION DU DEGRE DE DISTRIBUTION GEOMETRIQUE LIE A LA DIFFUSION ($D_{\text{géo}}$)	82
IV-2-1 / Reproduction d'un interstice	83
IV-2-1-1 / Fonctions d'entrées du système flou	84
IV-2-1-2 / Hypothèses de diffusion	88
IV-2-2 / Fusion de deux interstices	90
IV-2-3 / Scission d'un interstice	93
IV-2-4 / Disparition ou apparition d'un interstice	96

IV-3 / DEFINITION DU DEGRE DE DIFFUSION A TRAVERS LES COUPES SUCCESSIVES	96
IV-4 / CONCLUSION	98
CHAPITRE V : SIMULATION DE LA DIFFUSION DU LIQUIDE DANS UN FIL	100
V-1 / PROCEDURE DE SIMULATION	102
V-1-1 / Variables de simulation	102
V-1-2 / Simulation de la diffusion	108
V-1-3 / Apparition d'un interstice	110
V-1-4 / Algorithme principal	111
V-2 / RESULTATS OBTENUS A PARTIR DE LA SIMULATION	116
V-2-1 / Mode opératoire	116
V-2-2 / Procédure de simulation	117
V-2-3 / Comparaison des résultats	124
V-2-4 / Etude de la variance	124
V-3 / VARIATIONS DUES A LA STRUCTURE GEOMETRIQUE DU FIL PET	125
V-3-1 / Variations dues à la tension du fil	126
V-3-2 / Variations dues à la torsion du fil	126
V-4 / CONCLUSION	127
CONCLUSION GENERALE	128
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	131
ANNEXES	136

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les processus d'encollage, de teinture, d'imprégnation et de moulage de matériaux composites passent par la mise en contact d'un liquide avec une structure multifilamentaire se poursuivant par la migration spontanée du liquide au sein de cette structure (mouillage capillaire).

L'optimisation des procédés basés sur la mise en contact de structures fibreuses avec un liquide nécessite donc une bonne compréhension du phénomène de mouillage. Les méthodes permettant de caractériser le mouillage capillaire constituent une réponse à l'attente industrielle pour des raisons économiques et technologiques. Cette compréhension passe par une étude sur le fil qui est l'entité géométrique de base des structures textiles.

La qualité d'un fil dépend non seulement de ses propriétés mécaniques (allongement, rupture,...), mais aussi de son pouvoir de perméabilité, du mode de diffusion des liquides à travers sa structure interne, soit pour des préparations visant une utilisation en textile technique, soit pour améliorer son aptitude à certains traitements.

Les modèles géométriques et mécaniques existant [PEI 37], [OLO 64] s'intéressent plutôt à la forme et à la trajectoire des fils et non à leur structure interne. Pourtant l'étude de la structure géométrique interne des fils est un facteur déterminant pour la compréhension des phénomènes, malgré sa complexité.

Des travaux entamés dans le laboratoire GEMTEX [MON 96] et traitant les phénomènes de mouillage ont montré qu'on peut trouver une estimation des vitesses de

mouillage et calculer les hauteurs de diffusion atteintes par les liquides à travers certaines structures fibreuses. Ces études se sont intéressées principalement à la mise au point de dispositifs expérimentaux permettant l'acquisition rapide et précise des mesures de l'ascension des liquides à travers des fils et à la recherche de lois de diffusion capillaire, en se basant sur les travaux de Washburn [WAS 21].

Les résultats obtenus nous ont poussés à rechercher l'influence de la géométrie interne du fil sur les phénomènes de mouillage et en particulier à étudier l'influence de la distribution géométrique des monofilaments dans le fil.

Notre objectif est de comparer la diffusion d'un liquide obtenue expérimentalement à celle obtenue par modélisation de la distribution géométrique des monofilaments et par simulation de la diffusion selon ce modèle.

Pour cela, il a été nécessaire de consacrer le premier chapitre de ce mémoire aux travaux réalisés sur le fil et les structures lui ressemblant, afin de dégager certaines propriétés ou améliorer certaines méthodes. Dans la mesure où les études antérieures ne se sont pas intéressées à la structure géométrique, nous avons utilisé les coupes successives pour modéliser la structure géométrique interne d'un fil polyester à 88 monofilaments.

Le deuxième chapitre présente une méthode permettant :

- de figer la structure interne du fil sans perturber la distribution géométrique de ses monofilaments,
- de réaliser des coupes successives,
- d'extraire les caractéristiques géométriques propres de chaque coupe,
- de modéliser des relations liant les coupes entre elles.

Nous présentons, alors, dans le troisième chapitre, quelques notions théorique sur la diffusion d'un liquide dans un tube capillaire et quelques manipulations expérimentales réalisées sur la portion du fil qui a servi à la réalisation des coupes successives, pour visualiser le phénomène de mouillage et calculer les hauteurs moyennes atteintes par le liquide dans le fil.

A partir des observations effectuées sur le phénomène de mouillage et des caractéristiques des coupes successives, nous avons procédé dans le quatrième chapitre à une modélisation dans le sens de la diffusion. Cette modélisation est basée sur la théorie de la logique floue, en l'absence de modèle analytique et de lois théoriques caractérisant le phénomène de diffusion dans des capillaires à géométrie variable. La logique floue est adaptée à ce type de problème, car elle apporte une souplesse pour caractériser la relation entre l'espace des entrées et celui des sorties. Par ailleurs, elle permet de modéliser l'incertitude qui existe dans la structure géométrique du fil.

Les résultats obtenus à partir de la modélisation sont utilisés dans le cinquième chapitre comme paramètres d'entrée du réseau de capillaires construit à partir des relations liant les coupes. Les combinaisons de ces paramètres sont assimilées à une vitesse. Nous avons alors mis au point une technique de simulation pour visualiser la diffusion du liquide et pour calculer les hauteurs atteintes par celui-ci dans le fil. Ensuite, nous avons comparé les résultats obtenus à partir du modèle avec ceux obtenus expérimentalement pour la même portion du fil (chapitre II). Enfin, nous avons effectué une étude pour déterminer les coefficients de pondérations permettant de minimiser l'erreur entre le modèle et la réalité expérimentale. Selon ce modèle, la simulation de la diffusion du liquide nous a donné des résultats satisfaisant proche de la réalité.

La conclusion de ce mémoire analyse les limites de la méthode et propose des améliorations possibles.

CHAPITRE I

CONTEXTE DE L'ETUDE (Etudes effectuées sur le fil)

CONTEXTE DE L'ETUDE

(Etudes effectuées sur le fil)

L'utilisation de plus en plus poussée des textiles dans les matériaux composites, ainsi que le besoin d'une mise en oeuvre de plus en plus performante du fil, nécessite une connaissance très fine des structures internes des fils afin de mieux comprendre les mécanismes d'imprégnation. De nombreuses recherches ont été abordées, elles s'intéressent à plusieurs aspects d'études sur le fil.

De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'écoulement d'un liquide dans une préforme textile. Des aspects très variés ont été couverts. Certains chercheurs ont développé plusieurs types de dispositifs pour l'étude expérimentale de ce phénomène. Des exemples de dispositifs sont : la pesée [PER 94], l'observation optique du front du liquide diffusant [MON 96] ou par des appareils de mesures électriques (résistance ou capacité) sensibles à la quantité de liquide imprégnée [KAM 94]. Une grande partie de ces études est basée sur la loi de Washburn et sur les écoulements laminaires (cf. chapitre III).

Etant donné que les comportements physiques obtenus sont liés aux caractéristiques des interactions solide/liquide et également à l'organisation des fibres entre elles (pores) [SCH 60], certains chercheurs ont exploité les travaux traitant les lois d'écoulement dans les milieux poreux [BIN 96]. Ces lois ont été largement étudiées à des fins d'applications dans la mécanique des sols, l'hydrologie, le pétrole, les céramiques et la métallurgie des poudres. D'autres se sont intéressés à la modélisation de la structure du fil à partir des comportements mécaniques et géométriques. Ces modèles permettent l'interprétation des résultats expérimentaux tel que la tension et la torsion.

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques méthodes utilisées dans les différents domaines pour modéliser le fil.

I-1 / LOIS D'ÉCOULEMENT DANS LES MILIEUX POREUX

I-1-1 / Définition d'un milieu poreux

On peut décrire un milieu poreux comme étant un solide contenant des pores. Ces derniers de petites dimensions par rapport aux dimensions extérieures du matériau, sont assimilés à des espaces vides distribués plus ou moins régulièrement à travers le solide.

Scheidegger [SCH 60] classe les pores en deux familles :

- les pores interconnectés à travers lesquels le fluide peut s'écouler. Ceux-ci sont appelés pores effectifs,
- les pores non connectés, qui de point de vue de l'écoulement ne sont d'aucun intérêt.

Cette classification n'a pas d'intérêt dans le textile car on considère que les liquides progressent dans tout les pores.

I-1-2 / Porosité

La porosité absolue ε est le rapport du volume total du vide (V_{vide}) sur le volume total du matériau (V_{total}).

$$\varepsilon = \frac{V_{vide}}{V_{total}}$$

La porosité effective ε_e est le rapport du volume des pores effectifs (V_{pe}) sur le volume total.

$$\varepsilon_e = \frac{V_{pe}}{V_{total}}$$

I-1-3 / Etude de l'écoulement

Cette étude est basée sur la loi de Darcy [DAR 56] définie par :

$$q = \frac{Q}{A} = -\frac{K}{\mu} \text{grad}(P)$$

où :

q : vitesse moyenne prise sur un volume local appelée aussi vitesse superficielle,

Q : débit volumique moyen à travers la section d'aire A ,

K : perméabilité du milieu,

μ : viscosité du liquide,

$\text{grad}(P)$: gradient de la pression.

A partir de q , Dupuit [GUI 71] définit la vitesse moyenne \bar{V} dans les pores par :

$$\bar{V} = \frac{q}{\varepsilon}, \varepsilon \text{ étant la porosité absolue}$$

D'autres chercheurs [BRY 93] ont montré que cette vitesse est valable uniquement lorsque les pores sont de même diamètre. Ils ont alors utilisé la loi de Darcy en considérant des rayons variables. Les pores étant représentés par des sphères, ils supposent que leurs rayons R_i varient de ΔR sans modifier la position de leur centre. Pour chaque pore de rayon R_i , le nouveau rayon du pore est $R'_i = R_i + \Delta R$.

Ces travaux traitant les lois d'écoulement dans les milieux poreux ne peuvent pas être utilisés dans le milieu textile car les structures textiles sont différentes des structures des roches poreuses. En effet, le fil présente un arrangement particulier mettant en évidence une direction privilégiée (le sens des filaments) et des rayons de pores pouvant subir des variations non uniforme.

I-2 / MODELISATION GEOMETRIQUE DU FIL

Dans la modélisation géométrique, Keefe [KEE 92] considère que le fil est un objet solide. Il utilise une représentation paramétrique d'un point appartenant au fil. Il considère que l'axe du centre du fil suit une trajectoire curviligne et que la coupe transversale du fil est circulaire de rayon r . Ainsi, il représente les coordonnées locales (x, y, z) d'un point M appartenant à la périphérie d'une coupe de fil par :

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = r \cdot \cos u \\ z = r \cdot \sin u \end{cases} \quad \text{avec } u \text{ un paramètre de la surface tel que } 0 \leq u \leq 2\pi$$

A partir de ce résultat, l'auteur considère qu'un point appartenant à la surface du fil peut être exprimé en fonction de (x, y, z) en remplaçant r par ρ tel que $0 \leq \rho \leq r$.

Ce modèle permet de calculer le volume occupé par le fil par rapport au volume du cylindre circonscrit au fil. Selon l'auteur, ce modèle donne une description complète de la géométrie du fil et de la fibre. Il considère que ce résultat est la première étape pour comprendre les structures textiles et qu'il peut être utilisé dans les simulations des tissus, ou pour déterminer les perméabilités dans les tissus.

Ce modèle ne peut être appliqué pour déterminer les perméabilités dans le fil car on ne connaît pas la distribution des fibres à l'intérieur du fil.

Ces degrés d'irrégularités dans le fil peuvent être analysés à partir des processus de traitement d'images. Une de ces méthodes [WAT 92] permet de déterminer le diamètre et l'aire d'une fibre. Elle permet aussi de calculer les proportions des fibres de différentes natures sur une faible longueur du fil et d'évaluer quantitativement la taille moyenne d'un groupe de fibres.

Lorsqu'il s'agit de fils formés de mélange de fibres, ce modèle permet d'évaluer quantitativement les caractéristiques de ce mélange.

I-3 / MODELISATION MECANIQUE

La modélisation mécanique permet de définir une méthode de prévision des comportements mécaniques à partir de résultats expérimentaux. Cette modélisation est essentiellement basée sur les propriétés et les arrangement des fibres.

Pour la mise au point de leurs modèles, certains chercheurs [PEI 37] considèrent que l'épaisseur du fil est négligeable. D'autres ne sont pas du même avis [YAN 92], [LAN 97]. Langenhove [LAN 97] suppose que le fil est symétrique par rapport à un axe, qu'il est homogène sur toute sa longueur, que ces fibres sont cylindriques et transversalement isotropes. A partir de ces hypothèses, il déduit que les déformations et les contraintes sont uniquement fonction de la coordonnée radiale.

D'autres auteurs [REA 97] utilisent les propriétés du fil pour calculer les caractéristiques mécaniques des tissus telles que la traction, la flexion, la compression,...

Plusieurs approximations sont effectuées dans les méthodes précédentes, ceci est du à la complexité de la structure du fil.

Compte tenue de l'importante influence du fil sur les propriétés du matériau final (tissu, fil à coudre,...), de nombreuses études ont été réalisées sur le fil. Les quelques travaux présentés ci-dessus ne sont donnés qu'à titre indicatif.

I-4-MODELISATION PAR SEQUENCES D'IMAGES

Certaines méthodes de traitements d'images sont utilisées pour analyser les structures morphologiques des matériaux (cf. paragraphe II). Ces méthodes sont surtout utilisées dans les milieux poreux [KAC 89]. D'autres sont utilisées dans le but de reconstruire des modèles tridimensionnels à partir de coupes successives. Parmi les

techniques de reconstruction, on trouve l'approche morphologique qui utilise des opérations comme la dilatation, l'érosion et la squelettisation. Ces opérations sont réalisées sur les images pour extraire des informations importantes. Ohashi [OHA 92] utilise cette technique pour reconstruire les pores géométriques d'une roche. A partir de ces images, il cherche à retrouver les différentes couches formant la roche par interpolation en utilisant les différentes opérations algébriques (érosion, dilatation, squelettisation...).

Une autre méthode de reconstruction [MAL 95] est celle utilisée par Malcolm. Elle est basée sur la minimisation des algorithmes d'arborescences (minimum spanning tree algorithm). Il cherche à faire correspondre deux coupes significatives pour reconstruire des objets géoscientifiques en trois dimensions.

Ces méthodes et bien d'autres utilisant le traitement d'images permettent d'interpréter ou de reconstruire des modèles tridimensionnels. Ces méthodes, quoiqu'elles soient fort intéressantes ne sont pas transposables dans notre cas, du fait que la distribution géométrique des monofilaments dans le fil n'obéit à aucune loi de distribution.

I-5 / CONCLUSION

L'analyse des différents travaux effectués sur le fil, fait apparaître deux types d'études :

➤ étude de la géométrie extérieure du fil développée depuis la parution des travaux de Pierce [PEI 37]. L'ensemble de ces travaux s'intéresse à la prédiction des coefficients mécaniques des tissus, à la modélisation de certains essais mécaniques (traction, flexion,...).

➤ préparation du fil (encollage, ensimage,...) et identification des propriétés mécaniques pour améliorer certaines de ses caractéristiques (allongement, rupture, préparation pour couture...).

Nous constatons que les études s'intéressant à la géométrie interne du fil, sont pratiquement inexistantes. Ceci est peut être dû à :

➤ l'inexistence de modèles analytiques représentant la géométrie des interstices.

➤ l'inexistence de loi explicite caractérisant la relation entre la structure géométrique du fil et les effets de la diffusion d'un liquide dans le fil.

Nous proposons dans la suite de l'étude, une méthode permettant de réaliser la caractérisation géométrique d'une structure multifilamentaire.

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES COUPES DE FIL

CARACTERISATION DES COUPES DE FIL

II-1 / PREPARATION DES COUPES

II-1-1 / Imprégnation du fil (importance des interstices)

De nombreux procédés de mise en forme consistent à imprégner un fil par un liquide. Ces procédés se retrouvent aussi bien dans le domaine des tissus traditionnels (encollage, apprêts, ...) que dans le domaine des tissus techniques (enduction, composite, ...).

L'imprégnation du fil permet soit de le préparer pour un traitement, soit de modifier certaines de ses propriétés (propriétés de surfaces). Elle est une fonction de l'espace délimité par les monofilaments [AST 92], ces espaces sont appelés **interstices** [ZEN 95].

Dans plusieurs applications industrielles, la manière dont le liquide se répartit ou diffuse entre les filaments joue un rôle important dans la détermination de la qualité finale du produit textile. Dans certaines applications, nous constatons :

- qu'une bonne répartition du liquide est souhaitée, par exemple : dans l'ensimage, dans l'encollage (optimisation des propriétés mécaniques des composites par maximisation de la surface de contact résine/fibre),
- qu'une répartition périphérique de l'imprégnation est souhaitable, par exemple : en enduction, en imperméabilisation,

De cette présentation sommaire, nous constatons l'importance de ce facteur dans l'industrie textile. La connaissance de la cinétique de propagation du liquide à travers

le fil et les facteurs géométriques de la distributions des monofilaments sont donc des facteurs importants pour l'identification de la loi de la diffusion.

Cette étude est dédiée à la caractérisation de la distribution géométrique des monofilaments dans un fil polyester, pour étudier les phénomènes de diffusion.

II-1-2 / Processus de Fabrication du fil PET (Polyéthylène téréphtalate)

Le fil polyester est un ensemble de fibres synthétiques. Il résulte de la combinaison chimique d'un acide organique et d'un alcool. La solution du polymère obtenue passe dans un cylindre dont la base est percée d'un très grand nombre de trous, ce dispositif est appelé filière cf. figure II-1. Chaque trou donne naissance à un filament appelé aussi monofilament. Tous les monofilaments produits sont rassemblés en un fil continu qui est utilisé par la suite dans un très grand nombre d'applications.

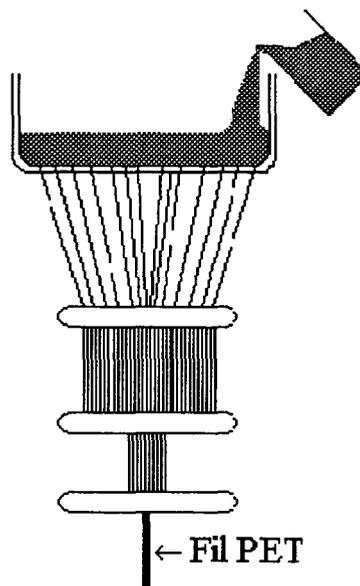
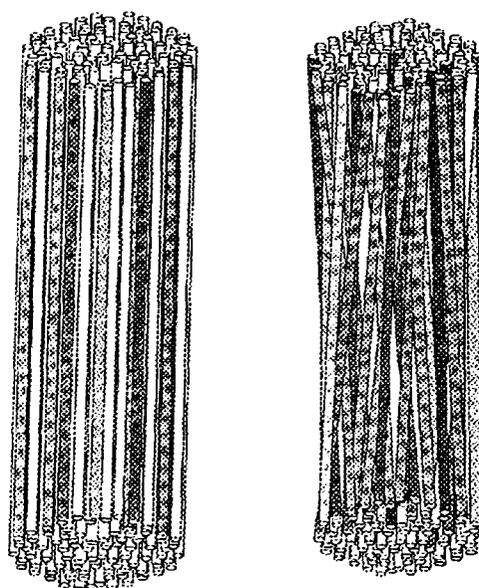


Figure II-1 : Principe d'obtention d'un fil PET

Le fil polyester est donc un multifilament constitué d'un grand nombre de filaments plus ou moins parallèles entre eux, qui créent une structure assimilable à un réseau de capillaires présentant une orientation privilégiée. Cette structure est inhérente au processus de fabrication (cf. figure II-2).

Le fil polyester utilisé dans cette étude est un fil de polyéthylène téréphtalate (PET) composé de 88 monofilaments continus ayant chacun un diamètre de 10 μm . Ce fil a simplement subi un ensimage afin d'éliminer l'électricité statique et d'améliorer la cohésion entre les monofilaments.



a: Structure idéale du fil

b: Structure réelle du fil

Figure II-2 : Structure Multifilamentaire du fil PET

II-1-3 / Préparation du fil pour les coupes transversales

II-1-3-1 / Présentation

Nous nous proposons d'analyser la distribution géométrique des 88 monofilaments dans le fil PET, afin d'en déterminer l'influence sur la diffusion et l'imprégnation. Nous allons à partir d'une coupe transversale du fil et au moyen de techniques de

reconnaissance de formes, localiser les monofilaments et déterminer les contours et les surfaces des interstices. Dans les deux paragraphes suivants nous présentons le procédé d'élaboration et de préparation de l'échantillon du fil, puis nous présentons la technique d'obtention des coupes.

II-1-3-2 / Préparation de l'échantillon

Pour étudier la géométrie et la distribution des interstices à l'intérieur du fil, il faut figer la position de tous ces monofilaments sans perturber leur distribution. Pour cela une résine de type " epoxy " a été utilisée. L'avantage de ce type de résine est qu'elle évite les déchaussements et la déformation des monofilaments lors du procédé de coupe.

La résine durcie totalement en 12 heures à température ambiante et son retrait est très faible. La solidification et l'imprégnation du fil polyester 88 monofilaments par cette résine sont effectuées selon les étapes suivantes (cf. figure II-3):

- le fil est placé dans un tube souple,
- l'extrémité inférieure est fixée (mécaniquement et par collage),
- l'extrémité supérieure est tendue par une masse de 20g après passage dans une poulie. Il est à noter que la valeur de la masse assurant la tension n'est pas arbitraire, mais a été définie de manière à ne pas modifier la distribution géométrique des monofilaments à l'intérieur du fil PET,
- la résine est versée dans le tube de manière continue afin d'éviter la formation des bulles d'air,
- l'ensemble est laissé à température ambiante douze heures.

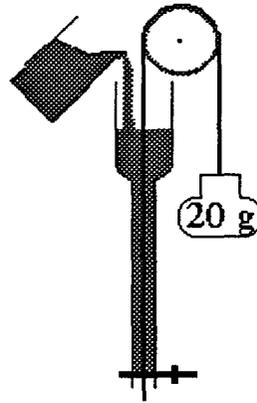


Figure II-3 : Préparation du fil

L'ensemble résine - fil forme alors un bloc solide et indissociable.

NOTA : La portion du fil qui a été coupée pour l'étude interstitielle est la même que celle qui a servi pour l'étude expérimentale de la diffusion présentée dans le chapitre III.

II-1-3-3 / Obtention des coupes

Un marquage coloré est réalisé sur deux côtés du bloc résine + fil. De cette manière nous repérons l'orientation de chacune des coupes. Cette orientation est ensuite restituée lors du traitement optique.

La coupe du bloc (résine + fil) est réalisée par une tronçonneuse semi-automatique de marque BUEHLER. L'épaisseur d'une coupe est de l'ordre de 0.3 mm, alors que la section du disque qui assure la coupe est de 0.5 mm. Les coupes obtenues sont alors espacées les unes des autres de 0.8 mm. Cet intervalle correspond au pas d'échantillonnage minimal qu'on peut obtenir entre deux coupes avec ce système.

Après plusieurs essais et observations expérimentales, nous avons constaté qu'un pas compris entre 0.8mm et 1mm permet de suivre correctement la distribution géométrique des interstices et donc de caractériser le phénomène d'imprégnation avec

précision. Lorsque le pas d'échantillonnage dépasse 1 millimètre, il devient impossible d'établir la continuité géométrique entre deux coupes, faute d'informations suffisantes. Notre choix s'est arrêté sur un pas d'échantillonnage de 0.8mm.

II-2 / ACQUISITION DES IMAGES DES COUPES

II-2-1 / Matériel d'acquisition

Le système d'acquisition d'images utilisé dans ce travail comporte :

- un microscope optique (Axioscope de Zeiss),
- une caméra,
- un moniteur relié à la caméra,
- un ordinateur muni du logiciel Pcscope.

Le schéma du principe de l'acquisition d'images est donné par la figure II-4 :

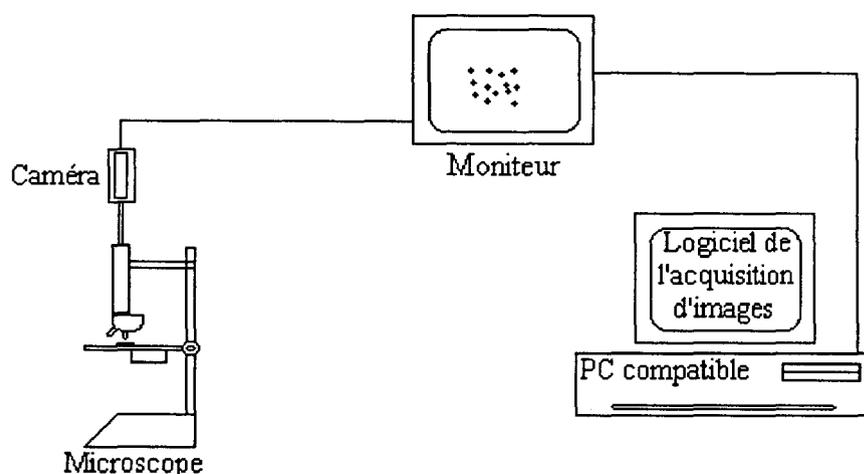


Figure II-4 : Principe de l'acquisition des images

Les dimensions du fil et des monofilaments nécessitent un grossissement de 2000 fois au microscope optique. L'image formée est captée (cf. figure II-5) par une caméra CCD montée directement sur le microscope. Un moniteur est couplé à cette caméra pour visualiser l'image microscopique. Le moniteur est branché sur le micro-ordinateur. Quand tous les réglages sont effectués le résultat est sauvegardé dans un fichier sous format TIFF.

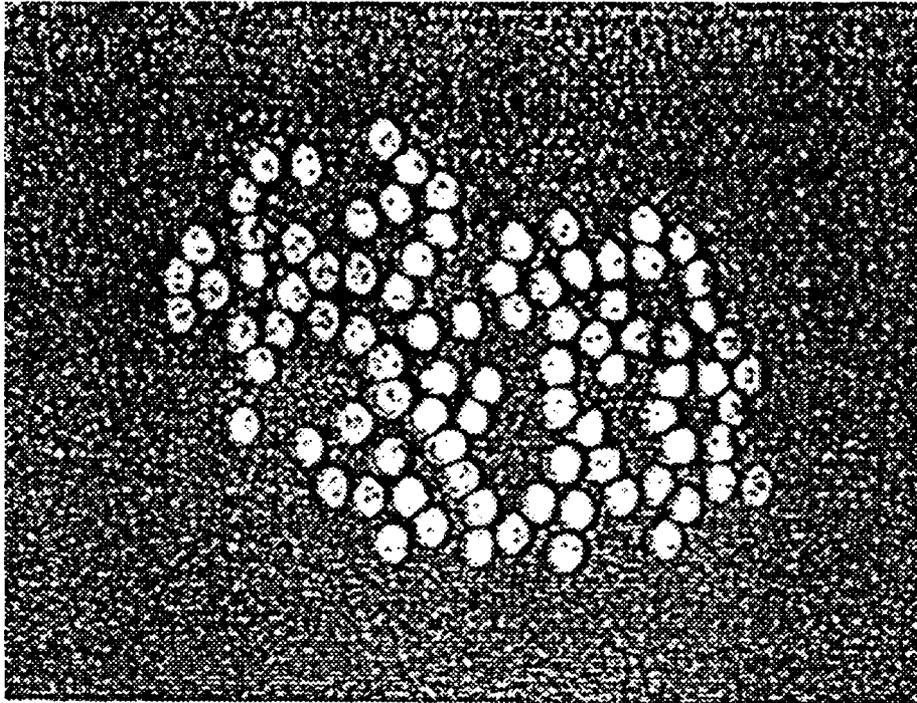


Figure II-5: Image Captée par le système optique

Il est à noter qu'aucun traitement de coloration n'a été nécessaire pour identifier les monofilaments de couleurs claires par rapport au fond de couleur sombre.

II-2-2 / Binarisation des Images

Une binarisation est nécessaire afin de distinguer sans ambiguïté chaque monofilament. Expérimentalement, il apparaît que l'histogramme de distribution de niveau de gris peut être divisé en trois zones: [0,90], [91,120] et [121,255]

correspondant respectivement à la classe résine, à la zone de seuil et à la classe des monofilaments.

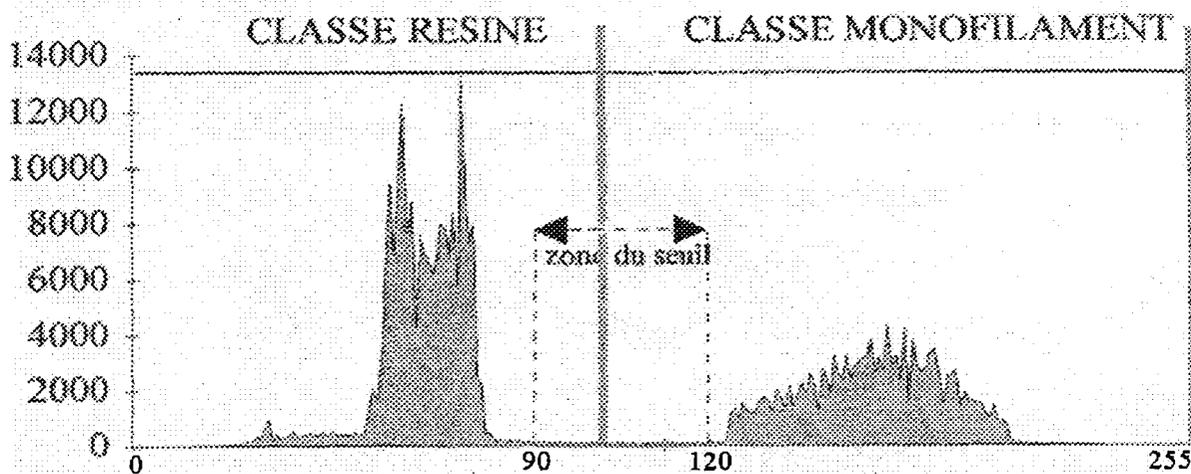


Figure II-6: Histogramme de binarisation

Pour déterminer la valeur du seuil, il suffit de chercher dans l'intervalle [91,120] le minimum, qui correspond au seuil de binarisation. Dès lors, binariser l'image consiste à mettre à 1 les pixels supérieurs au seuil (i.e les monofilaments qui constituent la forme) et mettre à 0 les pixels inférieurs au seuil (i.e la résine). Le résultat de cette opération est illustré par la figure II-7.

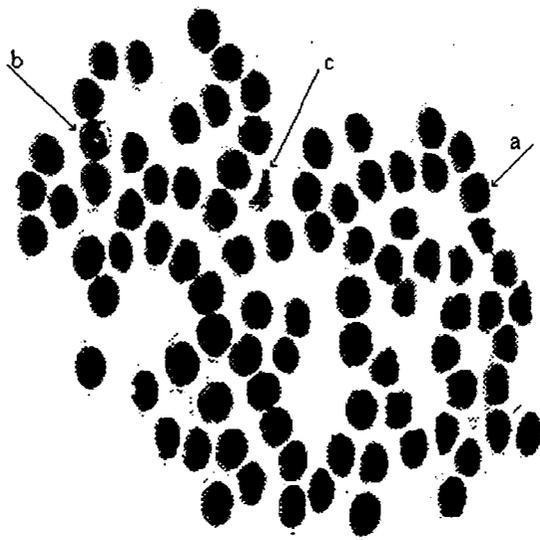


Figure II-7 : Image binarisée de la coupe

A partir de l'image binarisée, nous pouvons effectuer les constatations suivantes cf. figure II-7:

- (a) : la majorité des monofilaments sont représentés par des disques de rayons sensiblement égaux,
- (b) : d'autres présentent des artefacts (particulièrement des " trous ") que la binarisation n'a pas pu éliminer. Ces défauts proviennent des déformations dues à la coupe et aux bruits du système de vision,
- (c) : d'autres encore présentent un contour irrégulier.

II-2-3 / Recherche des centres des monofilaments (méthode de la boule)

Vu les artefacts et les irrégularités des contours de certains monofilaments, nous avons été amenés à déterminer une procédure robuste permettant de tenir compte des artefacts et des irrégularités des contours de certains monofilaments. Cette procédure doit permettre de localiser les positions et de corriger les contours irréguliers des monofilaments constituant le fil PET.

II-2-3-1 / Principe de la méthode

La méthode retenue pour localiser et corriger la position des monofilaments consiste à définir une boule topologique de rayon égal à celui des monofilaments. Cette boule balaye toute l'image binarisée. A chaque fois qu'elle se positionne sur un monofilament, les coordonnées de son centre sont enregistrées dans un fichier, cette méthode est connue sous le nom de " templete matching " [DAV 86].

II-2-3-2 / Mouvement de la boule

Pour des raisons de simplicité et de rapidité de calcul, la boule utilisée est un carré de diagonale égale au diamètre d'un monofilament orienté comme l'indique la figure II-8. Elle est définie à l'aide de la métrique d_4 connue sous le nom de " City block distance " [MEL 87]. Cette métrique définit une distance. Soient deux points $P(x_1, y_1)$ et $Q(x_2, y_2)$, la distance entre eux est définie par : $d_4(P, Q) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$

Cette métrique est :

- Positive $d_4(P, Q) \geq 0$
- Symétrique $\forall(P, Q) \quad d_4(P, Q) = d_4(Q, P)$
- Vérifie l'inégalité triangulaire $\forall(P, Q, R) \quad d_4(P, R) \leq d_4(P, Q) + d_4(Q, R)$

Lorsque le centre de la boule est situé à une position (x_0, y_0) , chaque point (x_m, y_m) inclus dans la boule vérifie l'inégalité suivante :

$$|x_0 - x_m| + |y_0 - y_m| \leq r$$

où r est le rayon d'un monofilament.

Le balayage de la boule est effectué de gauche à droite et de haut en bas (sens de la lecture). Le pas de balayage est égal au rayon de la boule (cf. figure II-8).

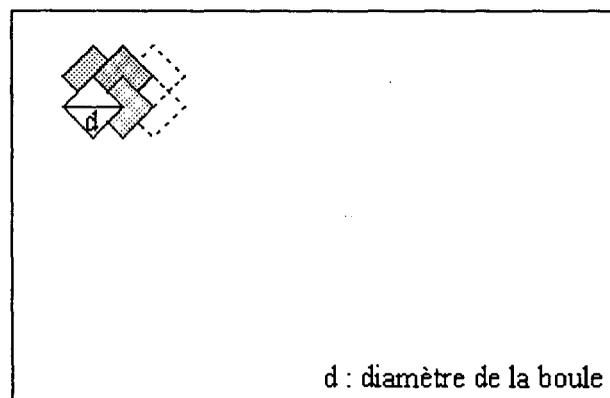


Figure II-8 : Partition de l'écran par des boules

A chaque position de la boule, nous calculons le nombre de pixels " 1 " à l'intérieur de la boule. Si ce nombre est égale à 0, il n'existe pas d'intersection entre celle-ci et un monofilament. La boule se trouve alors dans une région du fond. Lorsque le nombre de pixels " 1 " est non nul, la boule chevauche peut être un monofilament. La procédure de détection est alors activée.

- Procédure de détection des monofilaments

Pour éviter une recherche trop longue due au fait que la boule chevauche deux fois une même région, nous activons une phase de faible déplacement lorsque le nombre de pixels " 1 " est supérieur au quart de l'aire d'un monofilament ($\frac{\pi r^2}{4}$). Dans ce cas, la boule descend pixel par pixel jusqu'à la moitié du rayon d'un monofilament et avance de la même façon jusqu'au demi rayon. Nous calculons pour chaque position de la boule le nombre de pixels à " 1 "(cf. figure II-9).

Si pour une position donnée, ce nombre est supérieur à celui obtenu pour la position d'origine, il correspond alors à la meilleure superposition entre la boule et le monofilament. Nous enregistrons dans un fichier les coordonnées du centre de la boule correspondant, sinon nous enregistrons les coordonnées du centre de la boule obtenues avant le faible déplacement. Une fois la position du centre du monofilament trouvée, la boule revient à la position (I, J) pour incrémenter son déplacement. Cette procédure conduit à l'algorithme suivant :

- Algorithme de déplacement de la boule :

Soient M et N respectivement la longueur et la largeur de l'image, r le rayon de la boule, toutes ces grandeurs sont exprimées en nombre de pixels.

$J = r$

tant que $J \leq M-r$ faire

$I = r$

tant que $I \leq N-r$ faire

Max = nombre de pixels à "1" dans la boule

Si $Max > \frac{1}{4}$ (Aire d'un monofilament)

Traitement correspondant aux
faibles déplacements

faire $K = J - \frac{r}{2}$

tant que $K \leq J$ faire

$T = I$

tant que $T \leq I + \frac{r}{2}$ faire

E = nombre de Pixels à "1" à l'intérieur de la boule de centre (T,K)

si $E \geq Max$ alors le centre du monofilament correspond à la position

$Max = E$

fin si

$T = T + 1$

fin tant que

$K = K + 1$

fin tant que

fin si

fin tant que $I = I + r$

fin tant que $J = J + r$

fin

A la fin de la procédure, il arrive qu'on trouve un nombre de centres supérieur au nombre réel de monofilaments. Ceci est dû aux chevauchements des positions des monofilaments et aux irrégularités de leurs contours.

Cette procédure peut aussi donner plusieurs centres pour un même monofilament distants au maximum d'un demi rayon. Dans ce cas, il faut déterminer un centre moyen qui correspond à la position la plus probable du centre du monofilament. Cette recherche de la position des centres des monofilaments est présentée dans le paragraphe suivant.

II-2-3-3 / Moyenne des centres

Nous traitons un par un les centres trouvés par la méthode de la boule. Pour chaque centre, nous comparons ses coordonnées avec celles des autres centres trouvés:

- si la distance (d_4) entre un centre et un autre centre est inférieure à un demi rayon, ils correspondent à un seul et unique monofilament, nous calculons alors la moyenne des coordonnées de ces deux centres et nous enregistrons le résultat dans un fichier dit " fichier de position finale " .
- si la distance (d_4) entre un centre et un autre centre est supérieure à un demi rayon, les centres sont dits " isolés ". Dans ce cas, nous enregistrons leurs positions dans le fichier de position finale.

A la fin de la procédure moyenne, nous avons dans l'ancien fichier les coordonnées des anciens centres et dans le fichier de la position finale les centres qui correspondent aux positions exactes des monofilaments dans l'image et par conséquent dans le fil PET à 88 monofilaments cf. figure II-9.

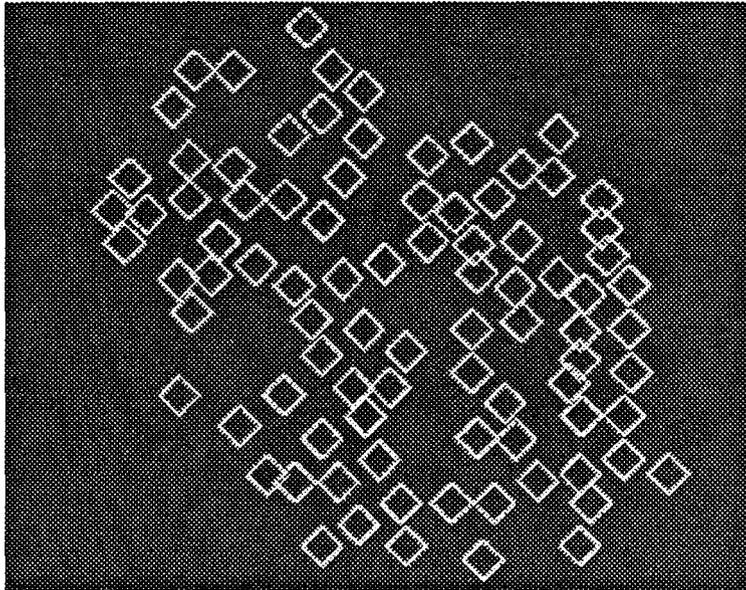


Figure II-9 : Localisation des centres des monofilaments

II-2-4 / Superposition des coupes

Au paragraphe II-1-3-3, nous avons présenté la méthode de repérage de l'orientation des coupes du fil. La figure II-10 illustre ce mode de repérage.

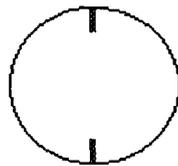


Figure II-10 : Repérage de l'orientation des coupes

Cependant, un décalage de type translation peut subsister pendant l'acquisition des différentes images par le système de vision. Il faut maintenant essayer de faire coïncider les coupes pour pouvoir suivre l'évolution des interstices dans le sens longitudinal.

Pour trouver la meilleure superposition des différentes coupes déjà binarisées et dont les monofilaments sont déjà localisés, plusieurs méthodes peuvent être appliquées.

II-2-4-1 / Méthode basée sur la superposition des monofilaments

Dans cette méthode, nous posons l'hypothèse suivante :

- ➔ H_1 : Le plus grand nombre de monofilaments ne changent pas de position d'une coupe à la suivante.

Dans notre problème, l'image d'une coupe est représentée par un ensemble de pixels. Ces pixels valent 1 lorsque nous sommes en présence d'un monofilament et 0 ailleurs.

Soit en notant N le nombre de pixels dans une ligne de l'image et M le nombre de pixels dans une colonne de l'image :

- $[C_{ij}]_{N \times M}$ = La matrice de la coupe C . Cette matrice représente l'image d'une coupe de fil polyester. Les éléments de cette matrice sont les pixels contenus dans cette image.
- $[C'_{ij}]_{N \times M}$ = La matrice de la coupe C' . Les éléments de cette matrice sont les pixels contenus dans l'image de la coupe C' qui vient juste après la coupe C .

Superposer les coupes C et C' revient à minimiser l'expression suivante :

$$\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M \Delta C_{ij} \right) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^M |C'_{ij} - C_{ij}| \right)$$

Cette méthode permet de superposer les différentes coupes les unes par rapport aux autres. Cependant l'hypothèse prise en considération, qui suppose que le plus grand nombre de monofilaments ne changent pas de position, fausse considérablement les

résultats du suivi longitudinal et suppose un arrangement préalable de la distribution des monofilaments à l'intérieur du fil.

II-2-4-2 / Méthode du Polygone

La méthode retenue dans ce travail est basée sur les hypothèses suivantes :

- ➔ H_1 : les coupes du fil PET possèdent toujours le même centre de gravité.
- ➔ H_2 : les monofilaments périphériques forment un polygone encadrant les monofilaments internes. Le centre du polygone correspond au centre de la coupe.

La méthode dite " du polygone " consiste à encadrer la coupe par des droites reliant les monofilaments du contour extérieur pour former un polygone cf. figure II-11. Dans ce cas et en appliquant les hypothèses déjà citées le centre de l'image correspond au centre du polygone.

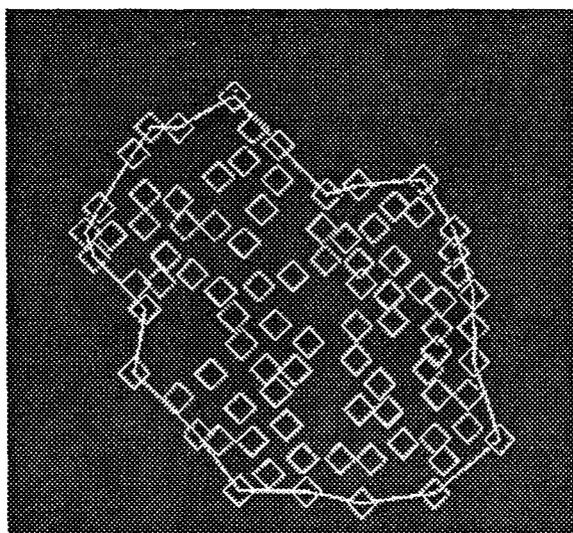


Figure II-11 : Polygone périphérique d'une coupe.

Calcul du centre du polygone:

Soient :

$Cc_i = \begin{pmatrix} Cc_{ix} \\ Cc_{iy} \end{pmatrix}$: Le centre de la coupe i, $Cc_j = \begin{pmatrix} Cc_{jx} \\ Cc_{jy} \end{pmatrix}$: Le centre de la coupe j.

Faire coïncider les coupes i et j revient à :

- calculer le décalage $\Delta Cc_{ij} = Cc_i - Cc_j$.
- prendre le centre de la coupe i comme référence.
- faire une translation équivalente au décalage de tous les centres des monofilaments de la coupe j.

Recherche du polygone qui encadre la coupe

Pour trouver le polygone externe qui encadre la coupe, nous définissons une tige (un segment de droite) de longueur L initialement. L'origine de la tige est confondu avec le premier monofilament de l'image (le plus haut à gauche). Ensuite, on fait pivoter la tige dans le sens des aiguilles d'une montre (ou l'inverse) jusqu'à ce qu'elle rencontre un autre monofilament. Le segment de droite qui relie ces deux monofilaments correspond alors au premier côté du polygone. Le monofilament rencontré devient l'origine de la nouvelle tige et la procédure est répétée jusqu'à ce que le polygone soit fermé.

Le choix de la longueur de la tige met en évidence deux problèmes :

- si on choisit une tige trop petite, nous obtenons une connexion même avec des monofilaments non périphériques,

- si on choisit une tige trop longue, le nombre de monofilaments qui encadrent la coupe devient petit, ces monofilaments ne peuvent plus représenter le périmètre du fil.

Après plusieurs essais nous avons choisi de prendre la longueur de la tige égale à six fois le diamètre d'un monofilament, avec ce choix nous obtenons une connexion des monofilaments périphériques et le polygone obtenu est régulier.

Eléments de Calcul

Soient $\begin{pmatrix} xa \\ ya \end{pmatrix}$ l'origine de la tige et $\begin{pmatrix} xb \\ yb \end{pmatrix}$ son extrémité. Nous avons alors :

$$\begin{cases} xb = xa + L \cdot \sin \alpha \\ yb = ya + L \cdot \cos \alpha \end{cases}, \text{ cf. figure II-12.}$$

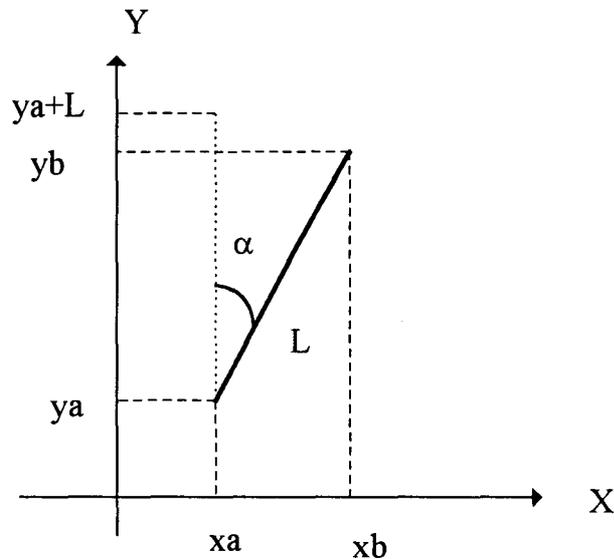


Figure II-12 : Représentation de la tige

Un point M de coordonnées $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$ appartient à la tige s'il vérifie l'équation suivante :

$$s = a.c + b \text{ avec :}$$

• si $xa \neq xb$ alors $a = \frac{ya - yb}{xa - xb}$ et $b = \frac{ya \cdot xb - yb \cdot xa}{xb - xa}$

• si $xa = xb$ alors $\begin{cases} c = xa \\ ya < s < yb \end{cases}$

II-3 / SUIVI D'UN INTERSTICE D'UNE COUPE A UNE AUTRE

D'après notre expérience, la diffusion du liquide dans un fil est essentiellement liée aux deux aspects géométriques suivants :

1 / les tailles et les formes des interstices sur chaque coupe,

2 / les variations géométriques (positions, formes, tailles) des interstices à travers différentes coupes.

Ces deux aspects devront être pris en compte dans la modélisation du fil afin de caractériser la corrélation entre la diffusion du liquide et la structure géométrique du fil. En nous basant sur ce principe, nous tentons tout d'abord de déterminer la surface de chaque interstice sur une coupe de fil.

Géométriquement, un interstice est mal défini car sa frontière est constituée d'un certain nombre de monofilaments plus ou moins connectés et il existe souvent des connexions vers l'extérieur. Les connexions des interstices devront être prise en compte dans le modèle de fil car leur évolution à travers différentes coupes est fortement liée à la diffusion du liquide. La présence des connexions rend la surface d'un interstice incertaine. En plus, deux interstices peuvent être fusionnés en un à la coupe suivante si la connexion entre eux augmente. Réciproquement, un interstice peut être scindé en deux à la coupe suivante si la connexion diminue.

Dans le modèle proposé, chaque interstice peut être caractérisé par son aire, son diamètre maximal et ses connexions. Une coupe de fil peut être représentée par un réseau composé des interstices interconnectés. Dans cette section, deux méthodes de recherche des interstices sont exposées dans les paragraphes suivants.

II-3-1 / Recherche des interstices

II-3-1-1 / 1^{ère} Méthode de recherche

La recherche des interstices se fait suivant un polygone ayant pour sommets les centres des monofilaments et qui délimitent une région de l'espace absente de toute forme.

La première méthode de recherche consiste à relier par des segments, les centres dont la distance (en d_4) est inférieure au double du diamètre d'un monofilament. On suppose que la diffusion du liquide à travers cet espace est négligeable.

Les segments définissent des frontières. A chaque centre, on associe les coefficients directeurs des bissectrices issus de ce centre. Deux centres appartiennent au même interstice si leurs demi bissectrices sont sécantes et si chaque segment ayant pour extrémités le centre et le point concourant ne rencontre pas de frontières.

Définitions

Les frontières : Ce sont les segments qui relient les centres des monofilaments. Elles définissent une troisième classe de l'image avec le fond et les monofilaments.

Codage : On regarde autour de chaque centre les huit pixels voisins. Si l'un de ces pixels appartient à la classe frontière, on lui associe le codage de Freeman correspondant [CHA 91].

Bissectrices : Si un centre a au plus un pixel voisin appartenant à la frontière, nous ne définissons pas de bissectrices. Sinon, nous balayons dans l'ordre croissant les huit positions du codage.

La moyenne des codes de Freeman entre deux positions consécutives définit l'angle directeur de la demi bissectrice au facteur $\pi / 8$ près (cf. figure II-13). Un centre a donc au maximum huit bissectrices.

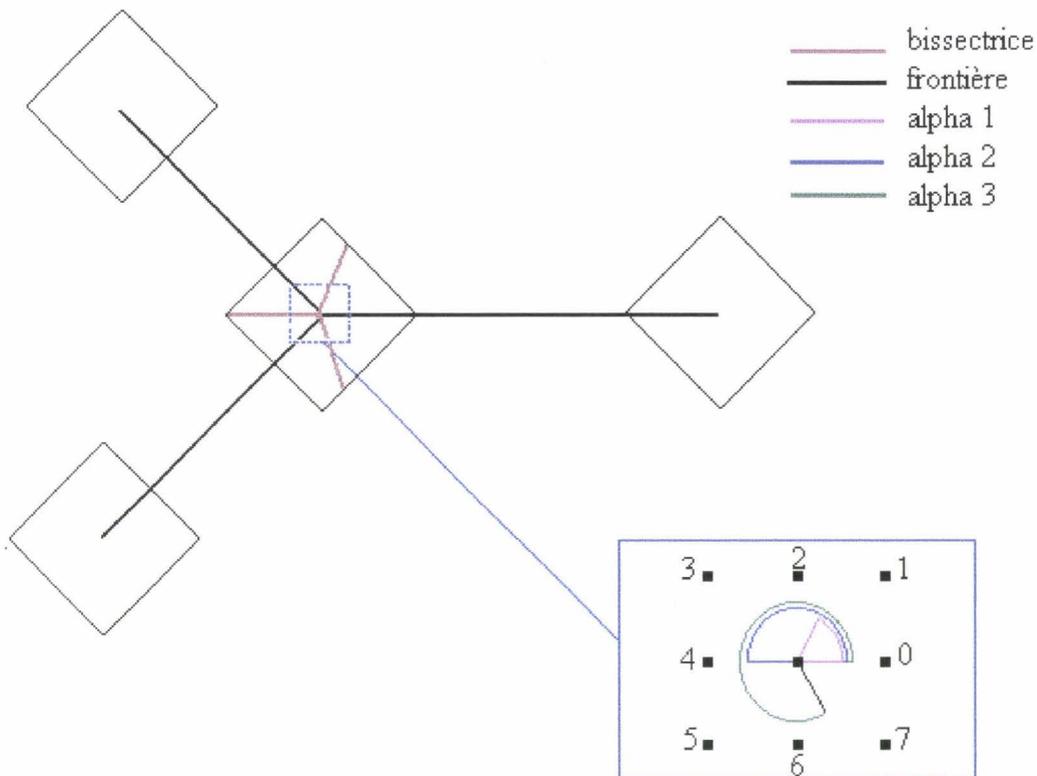


Figure II-13: Code de Freeman

Détermination du point concourant

Soient deux centres $I(x_i, y_i)$ et $J(x_j, y_j)$ et les angles α et β de leur bissectrices respectives.

Soient \vec{u} et \vec{v} les vecteurs directeurs des bissectrices relatives de I et J définissant leur représentation paramétrée.

La demi bissectrice d'origine I et de vecteur directeur \vec{u} est l'ensemble des points M tels que :

$$I\vec{M} = t_1 \cdot \vec{u} \text{ avec } t_1 \geq 0.$$

Par analogie, on détermine la deuxième demi bissectrice :

$$J\vec{M} = t_2 \cdot \vec{v} \text{ avec } t_2 \geq 0.$$

Rechercher le point concourant à ces deux bissectrices revient à résoudre un système à deux équations et deux inconnues t_1 et t_2

Pour que ce système ait une solution, il faut que les vecteurs directeurs soient non colinéaires. α et β étant les angles directeurs des deux demi bissectrices, il faut qu'ils vérifient les relations suivantes : $\alpha \neq \beta$ ou $\alpha \neq \beta \pm \pi$.

Si α et β vérifient les propriétés ci dessus, le système à alors une solution unique et on peut calculer t_1 et t_2 .

Les coordonnées de ce point concourant (x, y) sont :

$$\begin{cases} x = x_i + t_1 \cdot \cos \alpha \\ y = y_i - t_2 \cdot \sin \alpha \end{cases}$$

- Une fois ce point déterminé, nous traçons les segments de droites entre le point concourant et I d'une part et le point concourant et J d'autre part. Pour que I et J appartiennent à un même interstice, il faut que ces segments de droites ne rencontrent pas de frontières.
- Si $\alpha = \beta$ les points I et J n'appartiennent pas à un même interstice.
- Si $\alpha \neq \beta \pm \pi$, les points I et J appartiennent à un même interstice si le segment [I,J] ne traverse pas de frontières.

Détermination des interstices

A un centre et une de ces bissectrices fixée sont associés les centres dont les demi bissectrices sont sécantes et ne traversent pas une frontière. On détermine de cette façon des listes de centres.

Pour chacune des listes, à partir du premier centre, on recherche parmi les autres celui qui lui est le plus proche. Par une méthode itérative on parvient à ordonner la liste des centres qui définissent l'interstice.

Limite de cette méthode

La discrétisation des segments de droites frontières peut rajouter des bissectrices fictives et augmenter le temps d'exécution. Après plusieurs essais, cette méthode n'a pas donné entière satisfaction, nous avons alors choisi d'essayer une autre méthode.

II-3-1-2 / 2^{ème} Méthode (méthode de la boule topologique)

La détermination des surfaces des interstices a pour objectif d'évaluer la diffusion du liquide dans les interstices. Ainsi, l'essentiel de cette détermination devra être capable de localiser les connexions les plus importantes des interstices. Le contour d'un interstice étant mal défini, la recherche la plus efficace de sa surface doit s'appuyer sur le balayage dans l'espace vide avec un élément structurant. Dans cette section, nous proposons une méthode basée sur le déplacement d'une boule topologique. Le principe de cette méthode consiste à :

- définir une boule topologique de rayon ε , de centre $C_b (C_{xB(\varepsilon)}, C_{yB(\varepsilon)})$ notée $B(\varepsilon)$,
- cette boule balaye l'espace vide en touchant le bord d'un ou de plusieurs monofilaments (cf. figure II-16) afin de déterminer des listes de monofilaments liés entre eux (interstices),

- évaluer l'évolution des surfaces des interstices en faisant varier la valeur de ε ,
- trouver pour chaque interstice la valeur optimale de ε (notée ε_0) correspondant à la plus grande variation de surface. Les paramètres géométriques de cet interstice seront calculés par rapport à $B(\varepsilon_0)$,
- le balayage de la boule est effectué dans le sens des aiguilles d'une montre en maintenant en contact avec au moins un monofilament. Par exemple, dans la figure II-14, $B(\varepsilon)$ se déplace à partir de la position initiale autour du monofilament Mono. Une fois que $B(\varepsilon)$ est en contact avec le bord du monofilament Mono', cette boule quitte Mono et continue à se déplacer autour de Mono' jusqu'à ce que $B(\varepsilon)$ touche un autre monofilament. La procédure de balayage est détaillée dans le paragraphe suivant.

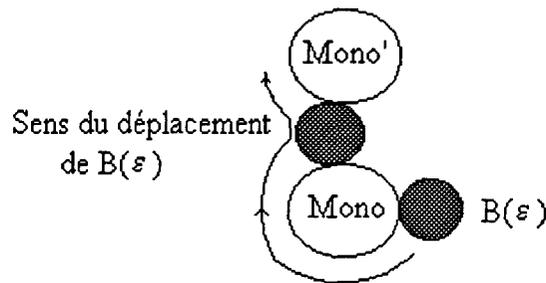


Figure II-14 : Déplacement de la boule

Procédure de balayage et formation des listes

Pour un monofilament nommé Mono de centre C_{Mono} (C_{xMono}, C_{yMono}), on définit la distance $d_{Mono, B(\varepsilon)}$ entre ce monofilament et la boule telle que :

$$d_{Mono, B(\varepsilon)} = \sqrt{(C_{xMono} - C_{xB(\varepsilon)})^2 + (C_{yMono} - C_{yB(\varepsilon)})^2}, \text{ si } d_{Mono, B(\varepsilon)} \leq \varepsilon + r \text{ où } r \text{ est le rayon}$$

d'un monofilament alors la boule touche le bord de Mono.

1 / position initiale: nous prenons dans l'espace vide une position quelconque située sur le bord d'un monofilament, de préférence le premier de la liste des 88 monofilaments. Nous avons alors, $d_{Mono, B(\varepsilon)} = \varepsilon + r$ et Aire $(B(\varepsilon) \cap \text{l'ensemble des monofilaments}) = 0$.

2 / en partant de cette position, $B(\varepsilon)$ se déplace autour de Mono dans le sens des aiguilles d'une montre (ou l'inverse) jusqu'à ce que l'une des deux conditions suivantes soit satisfaite :

- a) $B(\varepsilon)$ touche le bord d'un autre monofilament Mono' cf. figure II-15 (au cours du mouvement de $B(\varepsilon)$, il faut vérifier, à chaque nouvelle, position si elle touche le bord d'un autre monofilament).

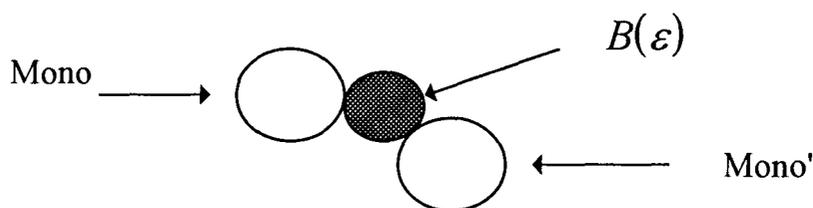


Figure II-15 : contact de $B(\varepsilon)$ avec deux monofilaments

- b) $B(\varepsilon)$ fait un tour complet autour de Mono sans toucher un autre monofilament, il faut reprendre une nouvelle position initiale.

Si la condition (a) est vérifiée, nous continuons le balayage autour de Mono', la procédure de balayage est répétée jusqu'à ce qu'on rencontre l'une des deux conditions suivantes :

- la boule $B(\varepsilon)$ touche le bord externe de l'image caractérisé par les quatre segments de droites suivants : $y=X_1$, $y=X_2$, $x=Y_1$, $x=Y_2$. Dans ce cas on obtient une chaîne de monofilaments constituant un contour externe. Cette chaîne est très utile dans la détermination des connexions externes des interstices.

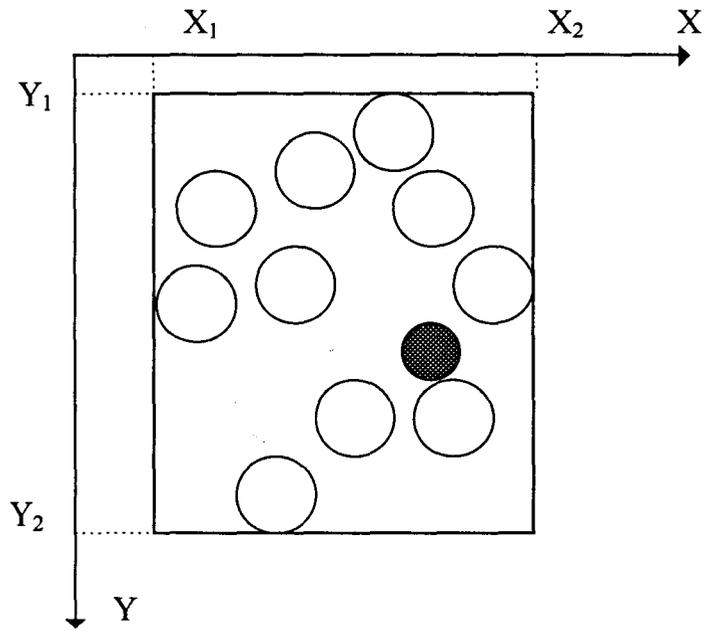


Figure II- 16 : Encadrement de l'image

$$\begin{cases} X_2 = C_{\max}^x + r \\ X_1 = C_{\min}^x - r \\ Y_2 = C_{\max}^y + r \\ Y_1 = C_{\min}^y - r \end{cases}$$

où pour tous les monofilaments Mono appartenant à l'image :

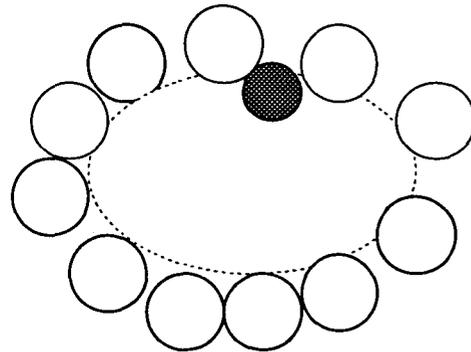
$$C_{\max}^x = \max_x \{C_{Mono}^x\}$$

$$C_{\min}^x = \min_x \{C_{Mono}^x\}$$

$$C_{\max}^y = \max_y \{C_{Mono}^y\}$$

$$C_{\min}^y = \min_y \{C_{Mono}^y\}$$

- $B(\varepsilon)$ fait un tour complet :



Dans ce cas, on obtient un interstice avec un contour fermé.

De cette façon, après le balayage de tous les monofilaments (de l'intérieur et de l'extérieur) nous obtenons des contours des interstices composés des listes ordonnées de monofilaments.

Un interstice est représenté par la liste correspondante de monofilaments ordonnés est caractérisé par sa surface $S(\varepsilon)$ qui est égale au nombre de pixels inclus à l'intérieur de son contour constitué des centres des monofilaments de cette liste.

A partir de la valeur maximale de ε définie a priori (ε_{\max}), nous traçons la surface de chaque interstice en fonction du rayon ε de la boule topologique $B(\varepsilon)$ cf. figure II-17.

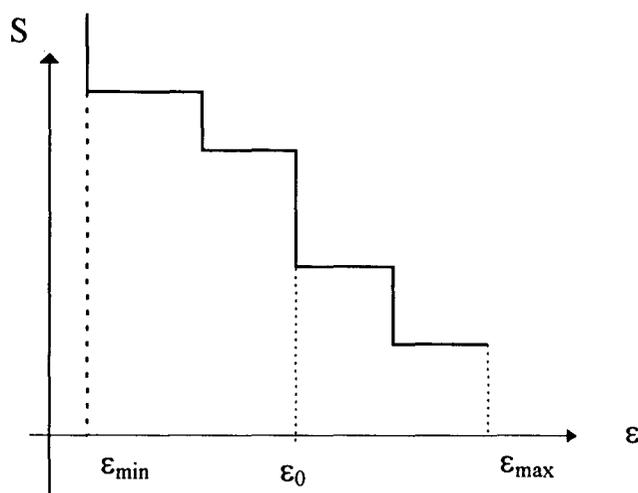


Figure II-17 : Distribution de surface d'un interstice en fonction de ε

La décroissance de la surface $S(\varepsilon)$ en fonction de ε est due au fait que $S(\varepsilon)$ fusionne avec un autre interstice adjacent lorsque $B(\varepsilon)$ devient suffisamment petite pour passer par la connexion entre ces deux interstices. La surface $S(\varepsilon)$ ne varie pas entre deux fusions car les monofilaments constituant son contour sont toujours identiques. Nous définissons une valeur minimale et une valeur maximale de ε (notée respectivement ε_{\min} et ε_{\max}) pour que ε varie uniquement dans l'intervalle $[\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}]$ (cf. figure II-17). Au dessous de ε_{\min} , $S(\varepsilon)$ n'est pas significative car la boule $B(\varepsilon)$ est trop petite et

la diffusion du liquide est impossible dans cet interstice. Au dessus de ε_{\max} , $S(\varepsilon)$ n'est pas significative non plus car $B(\varepsilon)$ est trop grande et aucune connexion ne peut être mise en évidence par $B(\varepsilon)$.

Pour simplifier le problème, nous prenons la valeur ε_0 , correspondant au plus grand saut (cf. figure II-17). En effet, cette valeur est le seuil permettant la fusion la plus importante de $S(\varepsilon)$ avec un interstice.

A partir de cette fonction $S(\varepsilon)$, on peut définir toutes les connexions. Par ailleurs, nous :

- éliminons toutes les listes non significatives caractérisées par des contours ouverts quelle que soit la valeur de ε (surface constante $\forall \varepsilon$).
- considérons qu'un interstice possède une connexion externe si:

* $S(\varepsilon)$ est caractérisée par un contour ouvert pour $\varepsilon \in [\varepsilon_{\min}, \varepsilon_0]$

et

* $S(\varepsilon)$ est caractérisée par un contour fermé pour $\varepsilon \in [\varepsilon_0, \varepsilon_{\max}]$

La connexion externe est caractérisée par la position des deux monofilaments laissant passer $B(\varepsilon_0)$ soit : $d_{Mono, B(\varepsilon_0)} = \varepsilon_0 + r$ et $d_{Mono', B(\varepsilon_0)} = \varepsilon_0 + r$. ε_0 correspond à un grand saut de $S(\varepsilon)$ (pour simplifier, nous supposons qu'il existe une seule connexion externe par $S(\varepsilon)$).

- considérons qu'une connexion interne est caractérisée par le plus grand saut de $S(\varepsilon)$ fermé $\varepsilon \in [\varepsilon_0, \varepsilon_{\max}]$.

Après plusieurs essais, cette méthode n'a pas donné tous les interstices visibles dans les différentes images binarisées. De plus, les interstices obtenus sont trouvés avec

avec différentes tailles de la boule $B(\varepsilon)$, ce qui entraîne une différence dans la caractérisation des connexions externes et aussi internes.

A la suite de l'échec de cette méthode, nous avons essayé d'autres méthodes basées sur la théorie de l'arborescence et des graphes. Ces dernières se sont heurtées à la distribution anarchique des monofilaments dans le fil PET.

De ce fait, nous avons choisi de définir les interstices d'une façon semi-automatique. Nous avons réalisé un programme permettant la génération de connexions entre les différents monofilaments. Nous considérons que la diffusion du liquide est impossible si la distance séparant deux monofilaments voisins est inférieure ou égale au diamètre d'un monofilament ($10 \mu\text{m}$). A partir des connexions générées automatiquement et à l'aide de la définition d'un curseur balayant l'écran, nous sélectionnons tous les interstices de chaque coupe. Ces interstices sont enregistrés dans un fichier. Les listes formées par un petit nombre de monofilaments (inférieur ou égal à 3) ne sont pas pris en compte (cf. figure II-18).

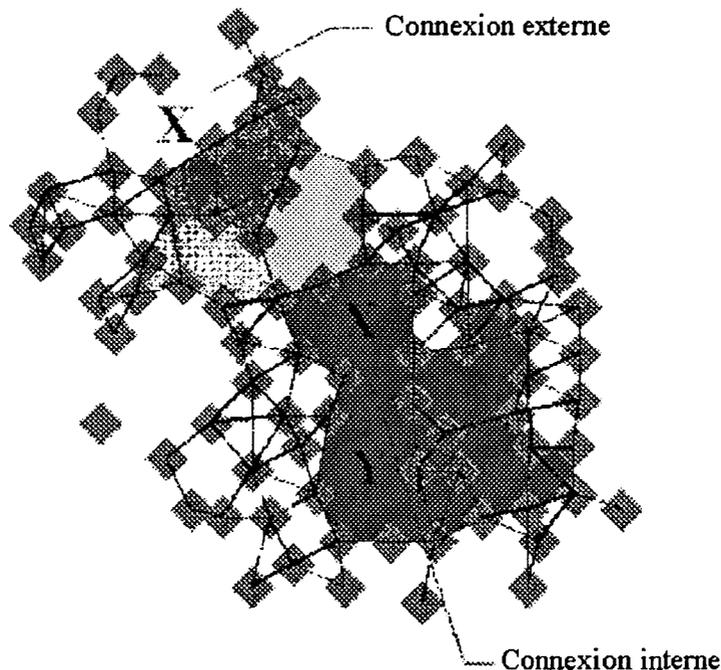


Figure II-18: Différents interstices dans une coupe

D'après les résultats obtenus, nous définissons un interstice par :

" Un interstice est un espace délimité par des monofilaments. Cet espace a la forme d'un polygone. Les monofilaments sont juxtaposés et la distance séparant deux monofilaments voisins est inférieure au diamètre d'un monofilament."

II-3-1-3 / Caractéristiques d'un interstice

Chaque interstice est caractérisée par :

- les centres des monofilaments qui le forment C_1, C_2, \dots, C_n ,
- son centre de gravité $C_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$,
- sa surface S ,
- sa connexion externe qui est la distance maximale entre deux centres successifs (C_i, C_{i+1}) qui sont situés à la périphérie de la coupe et appartiennent à cet interstice. $C_{ex} = \text{Max}(\|C_i - C_{i+1}\|)$ tel que C_i et C_{i+1} appartiennent tous les deux au même interstice,
- sa largeur maximale L_{\max} qui est égale à la distance maximale entre deux centres non successifs $L_{\max} = \text{Max}(\|C_i - C_j\|) / C_j \neq C_{i+1}$,
- sa connexion avec un autre interstice J définie par : $C(I, J) = \text{Max}(\|C_i - C_{i+1}\|)$ tel que C_i et C_{i+1} sont deux centres qui appartiennent respectivement aux interstices I et J .

II-3-2 / Suivi d'un interstice d'une coupe à une autre

II-3-2-1 / Différentes situations d'évolutions

Chaque interstice évolue d'une coupe à une autre, cette évolution peut correspondre à un changement dans une ou plusieurs de ses caractéristiques (L_{\max} , Connexion interne, Surface, ...). Elle correspond à l'un des cas suivants :

- fusion : Deux interstices de la coupe i peuvent fusionner en un seul interstice dans la coupe $i+1$.
- scission : Un interstice de la coupe i peut se diviser en deux ou plusieurs interstices dans la coupe $i+1$.
- disparition : Un interstice dans la coupe i peut disparaître dans la coupe $i+1$, la disparition ne concerne pas les monofilaments mais l'espace formé par l'interstice qui change totalement de caractéristiques de sorte qu'il n'y a plus de correspondance entre les anciennes et les nouvelles caractéristiques.
- apparition : Un interstice peut apparaître dans la coupe $i+1$, sans avoir une trace de celui-ci dans la coupe i .
- reproduction : C'est la reproduction de l'interstice dans la coupe suivante, seulement ses caractéristiques peuvent changer.

II-3-2-2 / Algorithme de suivi

Cet algorithme permet de déterminer à partir des mesures géométriques la situation d'évolution des interstices à travers deux coupes successives.

Soient I_1, I_2, \dots, I_n , l'ensemble des interstice appartenant à la coupe 1 et I'_1, I'_2, \dots, I'_p l'ensemble des interstice appartenant à la coupe 2

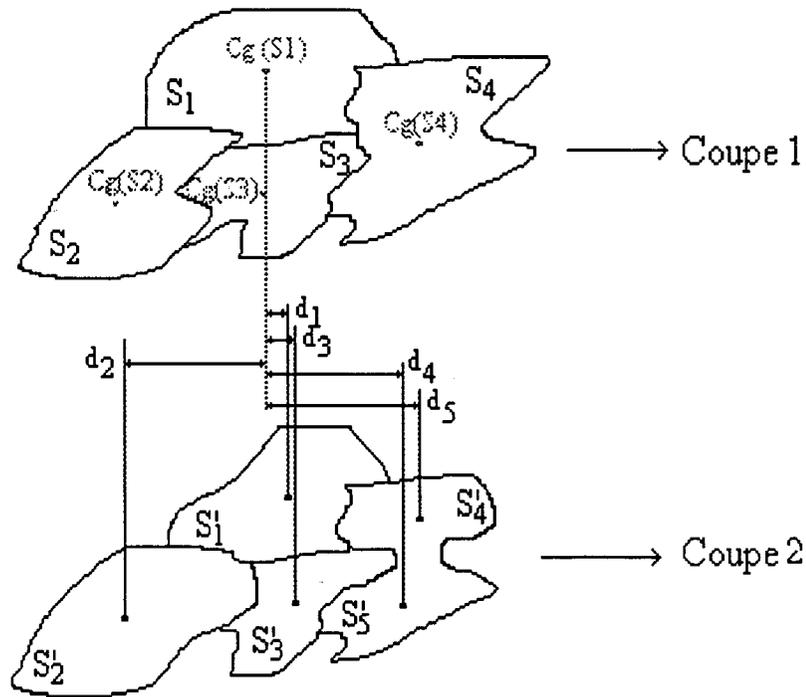


Figure II-19 : Suivi des interstices

Pour trouver le suivi des interstices I_i de la coupe 1 dans la coupe 2, nous effectuons les opérations suivantes :

- pour chaque interstice I_i de la coupe 1, nous calculons :

$$* d_k = \|C_g(I_i) - C_g(I'_k)\| \tag{1}$$

d_k représente la distance entre le centre de gravité de I_i et le centre de gravité de I'_k de la coupe 2 (cf. figure II-19)

Nous cherchons l'interstice I'_j de la coupe 2 pour lequel on a :

$$* d_j = \min_K \{d_k\} \tag{2}$$

- de la même manière, nous calculons pour tout interstice I'_i de la coupe 2

$$* d'_k = \left\| C_g(I'_i) - C_g(I_k) \right\| \quad (3)$$

d'_k représente la distance entre le centre de gravité de I'_i et le centre de gravité de I_k de la coupe 1

Nous cherchons l'interstice I_j de la coupe 1 pour lequel on a :

$$* d_j = \min_K \{d'_K\} \quad (4)$$

Nous considérons qu'un interstice I'_j de la coupe 2 est le successeur d'un interstice I_i de la coupe 1 :

- s'il vérifie la relation (2)

$$* \text{si } d_j < \frac{l_{\max}}{2}(I_i) \text{ et } d_j < \frac{l_{\max}}{2}(I'_j) \quad (5)$$

On note Successeur (I_i) = I'_j

De même pour un interstice I_i appartenant à la coupe 1, pour que I'_j de la coupe 2 soit son successeur il faut que :

- il vérifie la relation (4)

$$* d'_j < \frac{l_{\max}}{2}(I_i) \text{ et } d'_j < \frac{l_{\max}}{2}(I'_j) \quad (6)$$

Ainsi on a prédécesseur (I'_j) = I_i

En étudiant le suivi d'une coupe dans un seul sens (c'est à dire suivie de la coupe 1 dans la coupe 2 et d'après les relations précédentes , nous pouvons envisager les 5 cas possibles :

- Disparition d'un interstice

Si un interstice I de la coupe 1 ne vérifie pas la relation (5), nous dirons que cet interstice a disparu.

- Apparition d'un interstice

Si un interstice I' de la coupe 2 ne vérifie pas la relation (6), nous dirons que cet interstice est apparu.

- Fusion de deux interstices

Nous dirons que I_i et I_j de la coupe 1 ont fusionné si :

- ils vérifient chacun la relation (5)
- les interstices I'_k et I'_l qui vérifient la relation (2) représente le même interstice. Donc Successeur (I_i) = Successeur (I_j) = I'_k .

- Scission d'un interstice

Nous constatons la scission d'un interstice I lorsqu'il existe deux interstices I'_i et I'_k qui :

- vérifient chacun la relation (6)
- le prédécesseur de I'_i et I'_k dans la coupe 1 est I

Ainsi, les successeurs de I dans la coupe 2 sont I'_i et I'_k , nous notons :

$$\text{Successeur } (I) = I'_i + I'_k.$$

A partir des résultats obtenus, nous pouvons définir à chaque passage d'une coupe à la suivante une matrice dont les éléments indiquent les évolutions des interstices.

Notées $L_{x,x+1}$ pour le passage de la coupe x à la coupe $x+1$, ces matrices se présentent donc de la manière suivante :

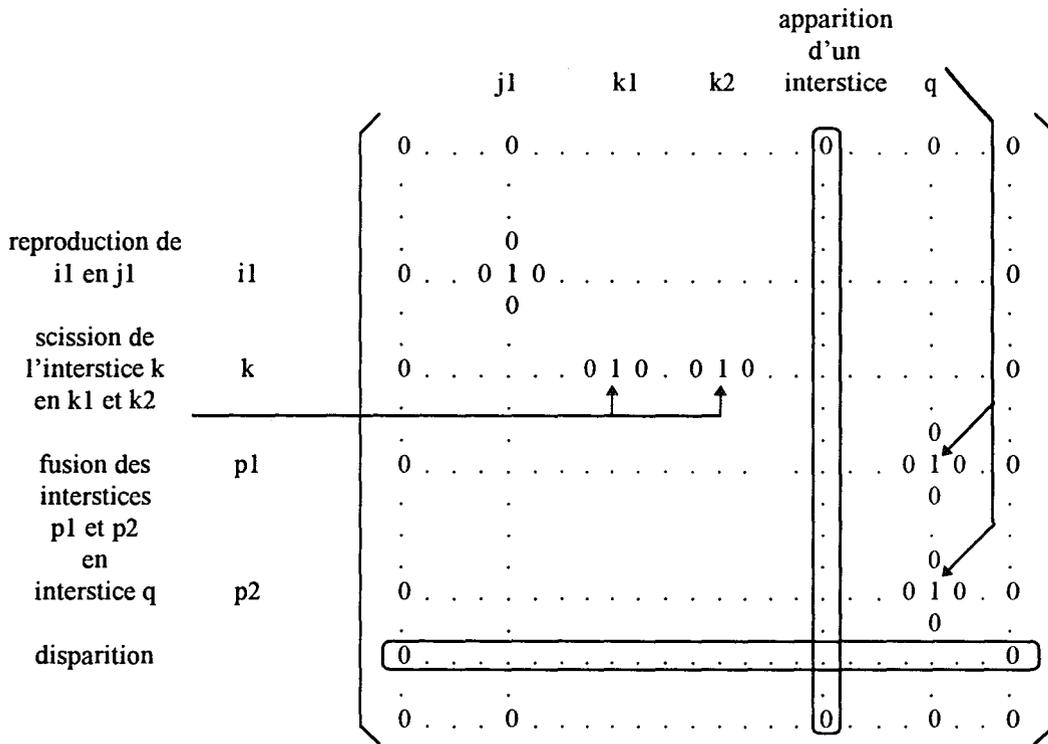


Figure II-20 : Matrice de passage entre deux coupes successives

On obtient une matrice m lignes (m interstices dans la coupe x) n colonnes (n interstices dans la coupe $x+1$) cf. figure II-20. Lorsqu'un interstice disparaît entre deux coupes successives la matrice contient une ligne complète de zéros. De même lorsqu'un interstice est généré entre deux coupes successives la matrice comporte une colonne complète de zéros. Les reproductions, scissions et fusions sont matérialisées par la présence d'une valeur unitaire aux lignes et colonnes correspondant aux interstices concernés par ces évolutions.

II-4 / Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la préparation des échantillons du fil de polyester pour l'obtention des coupes successives. Nous avons choisi un pas de coupe

(dépendant de la tronçonneuse) conservant la correspondance entre deux coupes successives. Par ailleurs, nous avons pris soin lors de cette préparation de ne pas modifier la distribution géométrique des monofilaments à l'intérieur du fil.

Ensuite, nous avons présenté la procédure de recherche des centres des monofilaments pour avoir une image de coupe correspondant parfaitement à la réalité et la technique de superposition des coupes permettant de suivre longitudinalement les informations sur chaque coupe.

Enfin, nous avons présenté les différentes méthodes utilisées pour localiser et définir des interstices constituant en quelques sortes les pores à travers lesquels le liquide diffuse. Nous avons ensuite, réalisé un algorithme de suivi pour chercher la correspondance des interstices entre deux coupes successives.

Les résultats obtenus et les observations réalisées sur les coupes montrent que leur frontières n'est pas définie de manière précise. Aussi, la porosité change d'une part selon le choix de la limite externe de la coupe, et d'autre part d'une coupe à l'autre. Dans ces conditions il n'est pas judicieux de choisir la porosité comme caractéristique de la coupe.

Dans le chapitre suivant, nous présentons quelques notions théoriques sur les phénomènes de diffusion capillaire et nous présentons une procédure expérimentale permettant de calculer les hauteurs atteintes lors de la diffusion du liquide dans le fil de polyester.

CHAPITRE III

ASCENSION CAPILLAIRE

ASCENSION CAPILLAIRE

Au laboratoire GEMTEX, une équipe de recherche étudie les phénomènes de mouillage dans le fil. Cette équipe a développé un système expérimental permettant de visualiser et de mesurer la hauteur atteinte par un liquide dans un fil. Ce dispositif expérimental permet d'étudier les phénomènes de mouillage. Dans ce chapitre, nous donnons une brève présentation des phénomènes de diffusion dans le fil PET à 88 monofilaments.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons une étude théorique sur les équations d'écoulements laminaires afin de dégager les lois de diffusion d'un liquide dans un milieu poreux.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous exposons les résultats de l'étude expérimentale réalisée pour avoir une idée sur le comportement naturel du fil de polyester vis-à-vis du liquide mouillant.

III-1 / NOTIONS THEORIQUES

Lorsqu'on présente un tube capillaire à la surface d'un bain de liquide mouillant, ce dernier monte spontanément.

La pénétration du fluide à l'intérieur d'un milieu poreux a pour origine une différence entre la pression du liquide et la pression de l'air à l'intérieur du tube. Ce phénomène est traduit par l'équation de Washburn [WAS 21] en adaptant aux capillaires les lois de Poiseuille [MON 96], [COM 78].

Les lois de Poiseuille qui fournissent des solutions exactes des équations de Navier-Stokes [COM 78] sont valables lorsque :

- l'écoulement est permanent, incompressible et laminaire,
- les vitesses d'écoulements sont relativement lentes ou s'il s'agit du mouvement de corps de dimensions réduites.

Ces conditions sont vérifiées dans le mouillage capillaire que nous étudions.

III-1-1 / Ecoulement de Poiseuille

On désigne sous ce nom l'écoulement laminaire d'un fluide se produisant dans une conduite cylindrique de section circulaire.

III-1-1-1 / Equation du mouvement :

Nous considérons le cas d'un fluide incompressible en écoulement permanent. Soit oz l'axe du tube de diamètre $D = 2R$, ox et oy sont quelconques perpendiculaires à oz et soit $V = [u \ v \ w]^T$ le vecteur vitesse de l'écoulement laminaire.

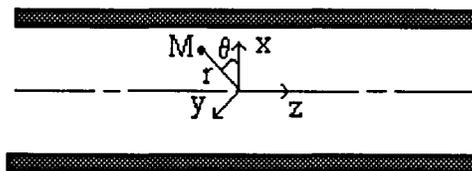


Figure III-1 : Ecoulement de Poiseuille

Les équations de Navier-Stokes [COM 78] s'écrivent :

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v \\ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta w \end{cases}$$

L'écoulement étant laminaire, les lignes de courant sont, par raison de symétrie parallèles à oz, donc les composantes u et v de la vitesse sont nulles : $u = v = 0$, ce qui donne :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad \text{D'où : } p = p(z)$$

La pression est donc constante dans une section droite du tube.

L'équation de continuité est :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Comme $u = v = 0$, alors $\frac{\partial w}{\partial z} = 0$

Par conséquent, w , la seule composante de la vitesse, ne dépend pas de z . Par raison de symétrie, cette vitesse ne peut être fonction que de la distance r à l'axe du tube. Si nous passons en coordonnées polaires, r , θ , z , la vitesse w ainsi que Δw ne dépendront pas de θ . Nous avons donc comme équation de mouvement:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \nu \Delta w$$

Avec :

$$\Delta w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right)$$

Par suite :

$$\frac{dp}{dz} = \eta \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right), \quad \eta = \rho * \nu$$

Où η est la viscosité du liquide.

L'intégration de cette équation permet de tirer une expression de la composante w de la vitesse du fluide qui ne dépend que de r .

Par ailleurs, la pression p ne dépendant que de z , l'égalité précédente n'est alors vérifiée qu'à condition que chaque membre soit égal à une constante. Appelons cette constante k_1 .

Nous avons alors : $\frac{dP}{dz} = k_1$, ce qui donne l'équation suivante : $P = k_1 * z$

La variation de hauteur dans la diffusion du liquide correspond à une variation de pression. La constante k_1 est égale alors à $\frac{\Delta P}{h}$.

D'autre part, nous avons : $\frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = k_1 \frac{r}{\eta}$, ce qui donne :

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{\Delta P}{h} \frac{r}{\eta}$$

Par intégration successives nous obtenons :

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{\Delta P}{h} \frac{r}{\eta} \Rightarrow r \frac{dw}{dr} = \frac{\Delta P}{h} \frac{r^2}{2\eta} + a$$

$$\frac{dw}{dr} = \frac{\Delta P}{h} \frac{r}{2\eta} + \frac{a}{r} \Rightarrow w = \frac{\Delta P}{h} \frac{r^2}{4\eta} + a \text{Log}r + b$$

a et b sont des constantes d'intégration définies par les conditions aux limites.

Pour un tuyau cylindrique w ne peut être défini quand $r = 0$ donc $a = 0$. De même w s'annule sur les parois du tube, quand $r = R$, d'où : $b = \frac{\Delta P}{h} \frac{R^2}{4\eta}$.

La répartition des vitesses à l'intérieur du tube circulaire est donné alors par l'expression suivante:

$$w = \frac{\Delta P}{4h\eta}(R^2 - r^2) = w_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \text{ avec } w_{\max} = \frac{\Delta P}{4h\eta} R^2$$

Cette équation exprimant la vitesse représente un parabolôïde de révolution, ayant son sommet sur l'axe du tube. Cette répartition est la même tout le long du tube.

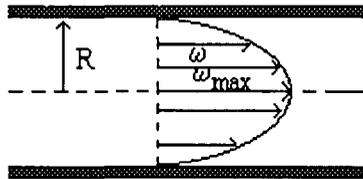


Figure III-2 : Répartition des vitesses d'écoulement à l'intérieur d'un tube rectiligne

III-1-1-2 / Calcul du débit

Le débit de fluide est donné par l'intégrale [WAS 21] (débit en volume):

$$q_v = \int_0^R 2\pi r w dr = \frac{\Delta P}{4h\eta} * 2\pi \int_0^R r(R^2 - r^2) dr = \frac{\Delta P}{h} \frac{\pi R^4}{8\eta}$$

Il vient : $q_v = \frac{\pi R^4}{8\eta h} \Delta p$. Cette dernière formule traduit la loi de Hagen-Poiseuille

[COM 78] : "Le débit est proportionnel à la différence de pression appliquée aux extrémités du tube et à la puissance 4 de son diamètre".

III-1-1-3 / Calcul de la vitesse maximale et de la vitesse moyenne

La vitesse est maximale au centre de la conduite, pour $r=0$. Elle est égale à :

$$w_{\max} = \frac{\Delta P}{4h\eta} R^2$$

La vitesse moyenne est calculée toujours par rapport au débit, elle est égale au débit divisé par la section de la conduite d'où on a :

$$\bar{w} = \frac{q_v}{S} = \frac{4q_v}{\pi D^2} = \frac{w_{\max}}{2}; \quad \bar{w} = \frac{R^2 * \Delta P}{8 * \eta * h}$$

Avec :

R : rayon du capillaire,

η : viscosité du liquide,

h : hauteur du liquide dans le capillaire,

ΔP : différence de pression.

$$\Delta P = | P_c - P_g |$$

telles que:

P_c : pression capillaire,

P_g : pression gravitationnelle.

La pression gravitationnelle est :

$$P_g = \rho * g * h$$

D'après l'équation de Laplace [LAP 06], la pression capillaire s'écrit :

$$P_c = \gamma * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

R_1 et R_2 sont les rayons de courbure principaux du ménisque.

Lorsque le capillaire cylindrique est de faible rayon, on a :

$$R_1 = R_2 = \frac{R}{\cos\theta}$$

La pression capillaire est alors : $P_c = \frac{2 * \gamma * \cos\theta}{R}$

Dans ce qui suit, nous allons exprimer l'équation de Lucas-Washburn relative à la diffusion d'un liquide dans une conduite cylindrique.

III-1-2 / Equation de Lucas-Washburn

D'après la loi de Jurin [ADA.90], la hauteur atteinte par le liquide dans un tube capillaire de rayon R à l'équilibre est :

$$h_e = \frac{2 * \gamma * \cos\theta}{R * g * \rho}$$

Avec :

γ = coefficient de tension du fil (tension par unité de longueur) (N/m),

θ : angle de contact liquide - fil,

R : rayon du fil,

g : accélération de pesanteur.

Nous obtenons donc l'équation de Washburn

$$\bar{w} = \frac{R^2}{8 * \eta * h} * \left(\frac{2 * \gamma * \cos\theta}{R} - \rho * g * h \right)$$

Par ailleurs, $\bar{w} = \frac{dh}{dt}$

Alors on a :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{R^2}{8 * \eta * h} * \left(\frac{2 * \gamma * \cos \theta}{R} - \rho * g * h \right)$$

L'équation définie ci-dessus est transformée comme suit :

$$h * dh = \frac{R * \gamma * \cos \theta}{4 * \eta} * \left(1 - \frac{h}{h_e} \right) * dt$$

Au début de l'ascension du liquide, la hauteur atteinte par le liquide est négligeable devant la hauteur du liquide à l'équilibre h_e .

$$h * dh = \frac{R * \gamma * \cos \theta}{4 * \eta} * dt$$

Nous aurons alors :

$$h^2 = \frac{R * \gamma * \cos \theta}{2 * \eta} * t$$

Appelons : $D = \frac{R * \gamma * \cos \theta}{2 * \eta}$, le coefficient de diffusion du liquide dans le capillaire.

La hauteur atteinte par le liquide dans le capillaire à l'instant t est alors:

$$h^2 = D * t$$

Lorsque t devient grand, c'est à dire aux instants longs, lorsque la hauteur du liquide h se rapproche de h_e , l'équation de h devient de la forme:

$$h = h_e * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

avec:

$$\tau = \frac{4 * k^4 * \eta}{\gamma * r^3} * \cos\theta$$

k : constante capillaire.

D'après les équations de diffusion obtenues, nous pouvons constater que la vitesse de montée du liquide est proportionnelle au rayon capillaire.

III-2 / METHODE EXPERIMENTALE

III-2-1 / Dispositif de mesure de l'ascension capillaire

Un système expérimental a été mis au point pour permettre la mesure de l'ascension d'un liquide dans les capillaires du multifilament [MON 96]. Ce système comprend :

- un dispositif assurant la circulation du fil,
- un système d'éclairage associant deux fibres optiques,
- une caméra reliée à un binoculaire,
- un écran de visualisation et un ordinateur pour le traitement des données.

Ce système est représenté par la figure III-3 :

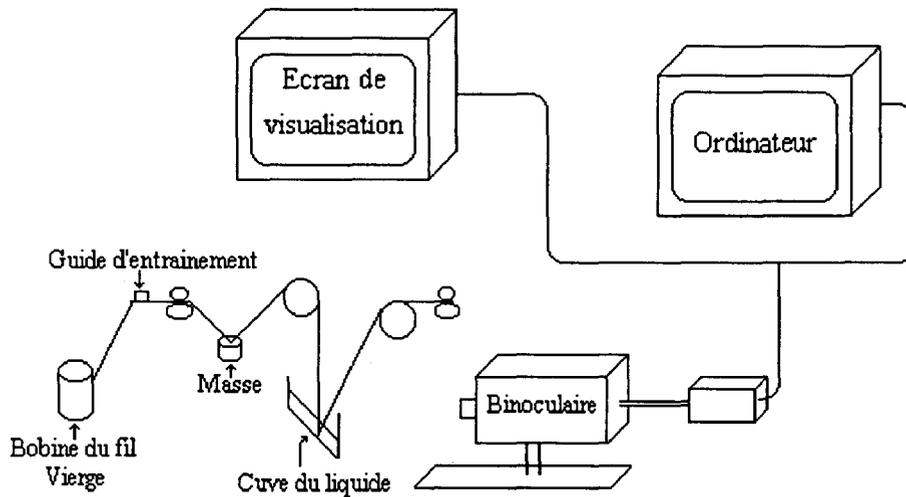


Figure III-3 : Représentation du dispositif expérimental

Afin de manipuler le multifilament de façon continue, une structure constituée de plusieurs guides mécaniques a été mise en place. Ce dispositif permet un glissement sans frottement du fil. De plus, il ne modifie pas la torsion du fil durant son parcours [MON 96].

Une masse est accrochée sur le fil entre les deux rouleaux d'entrée et la poulie d'entraînement située en amont de la cuve remplie par le liquide. Cette masse permet d'avoir une tension constante, ce qui permet une présentation identique du fil à la surface du bain mouillant. La valeur de la masse accrochée sur le fil n'est pas arbitraire, elle est choisie de façon à ne pas modifier la distribution géométrique des monofilaments à l'intérieur du fil PET 88 monofilaments (de l'ordre de 20g).

Le dispositif de vision (binoculaire) permet de prendre des images du fil située au dessus de la surface liquide et en amont de la cuve.

Ainsi une succession d'images numérisées du fil partiellement mouillé est saisie. Le fil mouillé sortant du bain du liquide est réceptionné par une bobine en aval de la cuve.

III-2-2 / Mesure de la hauteur atteinte par le liquide

III-2-2-1 / Principe de mesure

A l'aide du dispositif de vision, l'image est représentée sur l'écran par des valeurs différentes de niveau de gris.

Il est à noter que dans l'ensemble de cette étude, les niveaux de gris élevés correspondent à des images claires et que les images sombres ont des niveaux de gris faibles. Donc le niveau de gris du fil sec est plus important que le niveau de gris du fil mouillé cf. figure III-4.

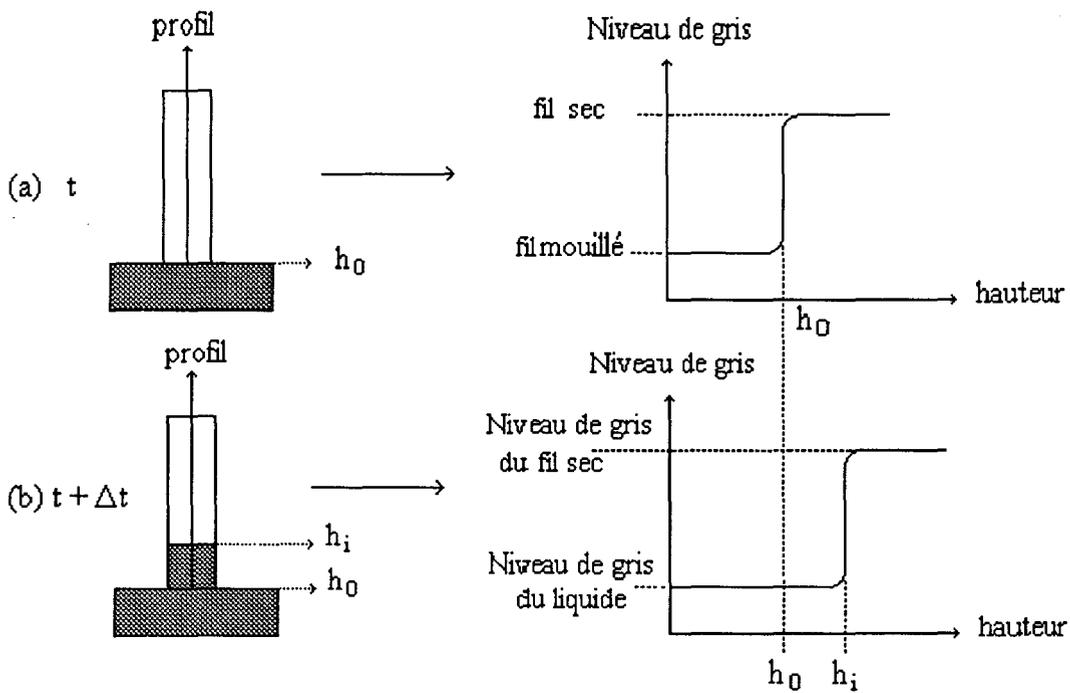


Figure III-4 : Niveaux de gris du fil à différents instants

Le fil de polyester est représenté sur l'écran, en largeur, par des pixels. L'ascension du liquide dans le fil n'est pas uniforme. Si on divise le fil en différentes colonnes, on peut observer des différentes vitesses de diffusion et différentes hauteurs atteintes par

le liquide dans le fil. Donc, pour suivre l'évolution du liquide à l'intérieur du fil, nous choisissons de manière aléatoire une des colonnes qui le compose et nous effectuons la lecture du niveau de gris de cette colonne à différents instants.

La hauteur atteinte par le liquide à l'intérieur du fil à un instant donné peut être calculée à partir du graphe de niveau de gris correspondant à cet instant.

Le fait que le liquide se diffuse avec différentes vitesses est essentiellement lié à la distribution géométrique non uniforme des monofilaments à l'intérieur du fil. En plus, la montée du liquide est une procédure progressive et continue sans évolution brutale. Ceci est constaté par une croissance lente du niveau de gris de l'état mouillé à l'état sec du fil (cf. figure III-5).

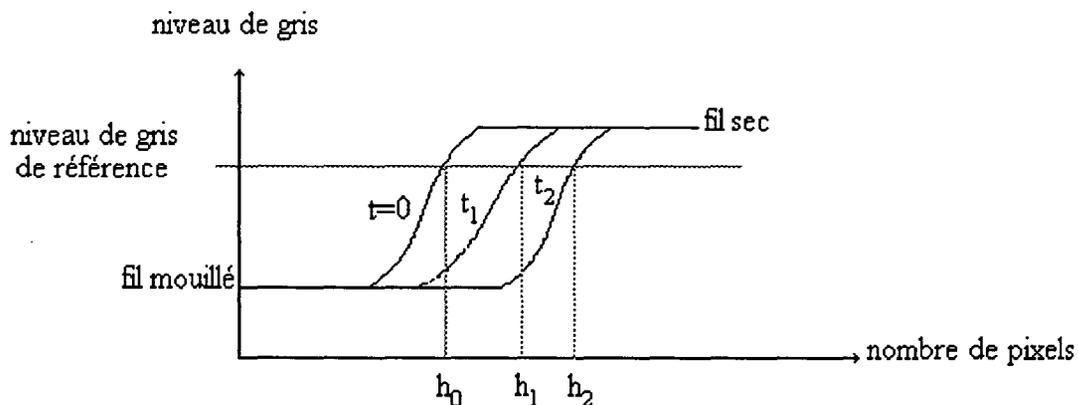


Figure III-5 : Courbe des niveaux de gris du fil à différents instants

III-2-2-2 / Mesures Effectuées :

Nous avons choisi comme liquide mouillant la résine époxy utilisée pour l'obtention des coupes (cf. Chapitre II). Cette résine est visqueuse, elle est homogène et elle permet d'avoir une diffusion qui ne dépend que de la distribution géométrique des monofilaments à l'intérieur du fil.

Le fil utilisé dans cette étude expérimentale est le PET à 88 monofilaments. Ce fil n'a pas subi de traitement préalable.

NOTA : La portion du fil qui a servi pour l'étude de diffusion dans la partie expérimentale est la même que celle qui a été coupée pour l'étude interstitielle.

A chaque instant t , un enregistrement complet de l'état de la diffusion dans le fil est réalisé. De cette manière, nous pouvons calculer les hauteurs atteintes par le liquide dans les différentes colonnes du fil.

Après plusieurs observations expérimentales, nous avons subdivisé la largeur du fil sur dix colonnes équidistantes. Cette subdivision nous permet de mettre en évidence la non uniformité de la diffusion dans le fil PET 88 cf. figure III-6.

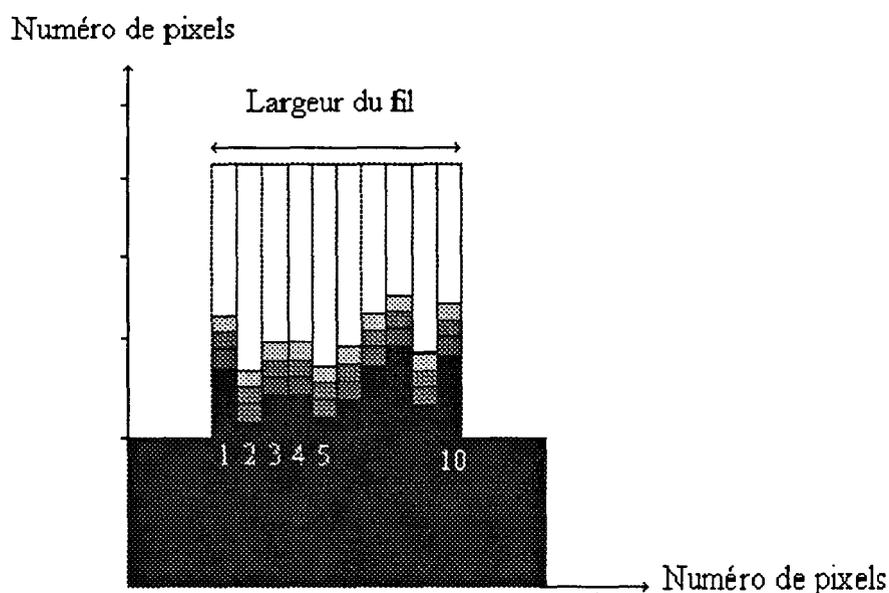


Figure III-6: Etat du fil à un instant t

Les résultats obtenus sur la colonne située au milieu du fil polyester à 88 monofilaments (colonne N°5) sont donnés par la figure III-7.

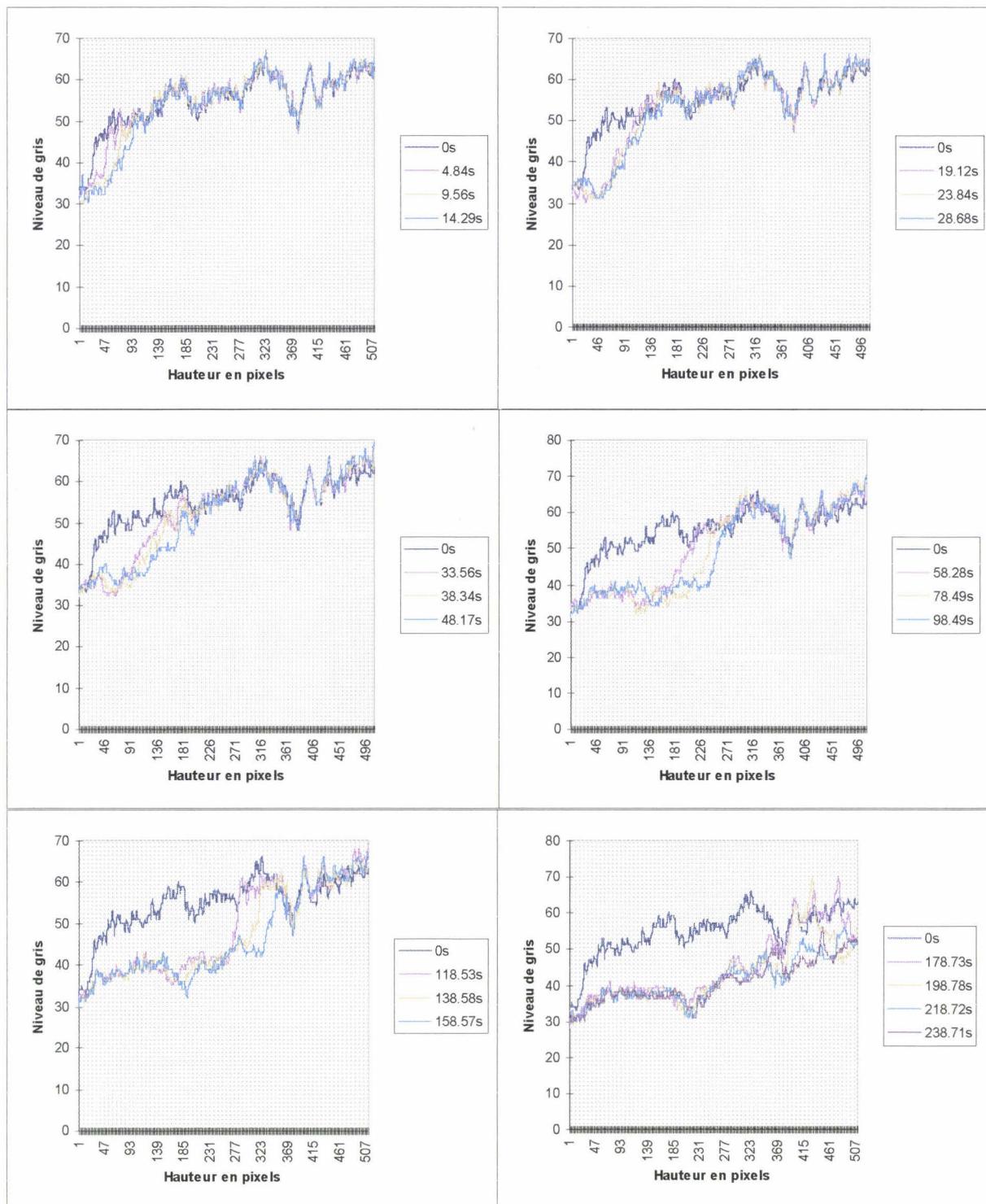


Figure III-7 : Niveaux de gris dans une colonne à différents instants

Il est à noter que les signaux obtenus présentent des perturbations et des fluctuations. Elles sont dues essentiellement au dispositif d'éclairage utilisé. En effet, le signal est perturbé sur toute la longueur du fil, qu'il soit mouillé ou non. Les

principales causes sont liées à la réflexion des rayons lumineux sur les monofilaments constituant le fil, ce qui engendre une hétérogénéité optique tout au long du fil (cf. figure III-7).

Nous représentons alors la diffusion du liquide dans la colonne 5 du fil par le graphe III-8:

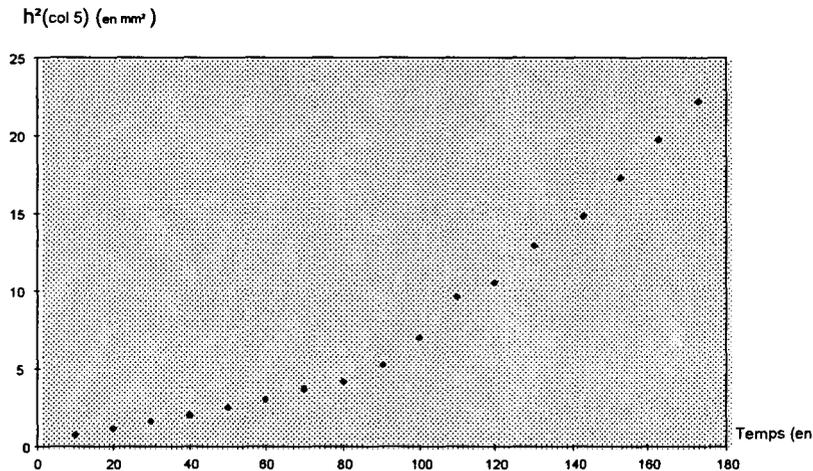


Figure III-8 : Diffusion expérimentale du liquide dans la colonne N°5

$h(\text{col } 5)$ est la hauteur atteinte par le liquide dans la colonne 5 à différents instants.

Cette opération de calcul des hauteurs est répétée pour l'ensemble des colonnes. En tenant compte de toutes les colonnes, nous calculons la moyenne des hauteurs H_{moyexp} , qui correspond alors à la hauteur moyenne atteinte par le liquide dans le fil à l'instant t .

$$H_{\text{moy exp}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{col}}} h(i)}{N_{\text{col}}}, \quad N_{\text{col}} = \text{nombre total de colonnes}$$

Nous traçons la courbe de la hauteur moyenne au carrée atteinte par le liquide en fonction du temps cf. figure III-9.

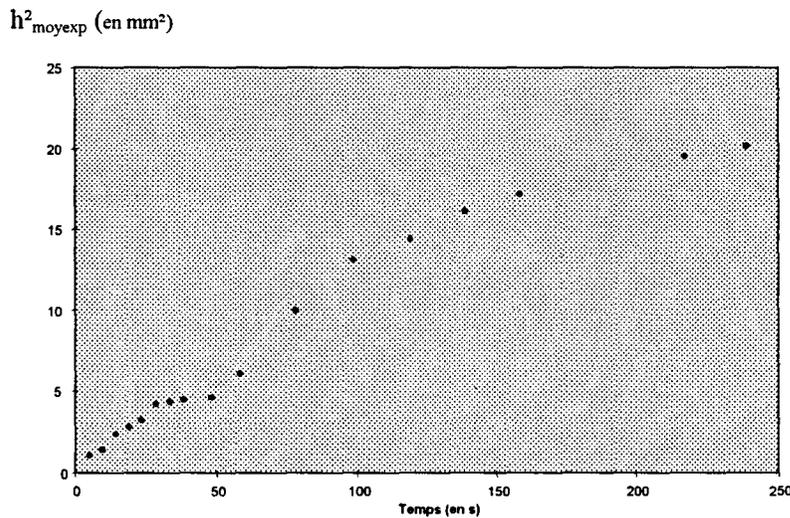


Figure III-9 : Courbe de la hauteur moyenne au carrée atteinte par le liquide dans le fil en fonction du temps

Plusieurs mesures dans les mêmes conditions expérimentales sont réalisées avec la résine epoxy, une évolution similaire de h^2_{moyexp} en fonction du temps est observée à travers tous les résultats.

Nous constatons que la diffusion moyenne suit grossièrement la loi de Washburn. Ceci est dû à la structure géométrique du fil qui est beaucoup plus complexe que celle d'un tube capillaire. En effet, une portion cylindrique du fil ne peut pas être assimilée à un cylindre capillaire, car, une telle portion est en fait constituée d'un empilement discontinu d'éléments de monofilaments et d'éléments d'interstices. Dans de telles conditions la loi de Washburn ne peut pas être vérifiée sur une portion cylindrique du fil. Par contre, en étudiant la diffusion sur l'ensemble des colonnes composant le fil et en calculant la moyenne de ces valeurs nous nous approchons d'une représentation plutôt linéaire de la diffusion, par effet statistique.

III-3 / CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les lois de diffusion dans le cas d'un écoulement laminaire permanent. Ces lois s'appuient sur les équations aux dérivées

partielles de Navier-Stokes. De ces équations, nous avons montré les fondements de la relation de Washburn qui décrit la cinétique de pénétration d'un liquide dans un milieu poreux en utilisant comme modèle un tube capillaire cylindrique.

Ensuite, nous avons procédé à une étude expérimentale de la diffusion de la résine epoxy dans le fil polyester à 88 monofilaments. De cette étude nous constatons que la diffusion du liquide dans le fil suit grossièrement la loi de Washburn. Ceci est dû à la structure géométrique du fil qui est beaucoup plus complexe que celle d'un tube. Nous pouvons donc estimer que les variations des interstices influent sur le coefficient de diffusion D .

Dans la suite de cette étude, nous introduisons la notion de logique floue à partir de laquelle nous essayons de corriger le coefficient de diffusion de la loi de Washburn par un degré de diffusion géométrique qui exprime le changement de forme et de trajectoire des interstices à l'intérieur du fil étudié.

CHAPITRE IV

MODELISATION DE LA STRUCTURE GEOMETRIQUE DU FIL

MODELISATION DE LA STRUCTURE GEOMETRIQUE DU FIL

L'étude expérimentale de l'ascension du liquide dans les capillaires du fil PET à 88 monofilaments, qui a été réalisée (cf. chapitre III), fait apparaître que la distribution géométrique des monofilaments est un paramètre fondamental dans la diffusion du liquide dans le fil.

En effet, un fil ne possède pas de modèle analytique qui peut représenter la distribution géométrique de ses monofilaments. Aussi, les lois de la physique et des écoulements ne permettent pas à l'état actuel des connaissances d'explicitier une relation mathématique exacte (ou rigoureuse) décrivant le phénomène du mouillage à travers un fil multifilamentaire.

Par ailleurs, les images successives du fil PET cf. chapitre II, nous ont permis pour un fil d'extraire des informations concernant la géométrie des interstices dans lesquels le liquide se diffuse. Ceci permet de représenter la structure géométrique du fil par un modèle de suivi des interstices. Nous essayons alors, à partir des données obtenues sur la structure géométrique du fil et ceux mesurés par les expériences de mouillages, de trouver une relation liant la géométrie du fil aux effets de mouillages.

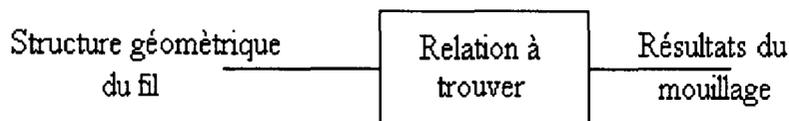


Figure IV-1 : Synoptique de la relation à trouver

Les caractéristiques géométriques des interstices (centre d'inertie, surface, connexions,...) obtenues par l'observation des coupes du fil PET, nous permettent

d'émettre des hypothèses et des règles de diffusion. Ceux-ci définissent des degrés de diffusion tenant en compte la distribution géométrique des monofilaments dans le fil polyester.

Les hypothèses de diffusion capillaire sont à exprimer en terme d'expressions linguistiques et transformées en relation floues. Ceci nous amène à présenter quelques principes de la logique floue.

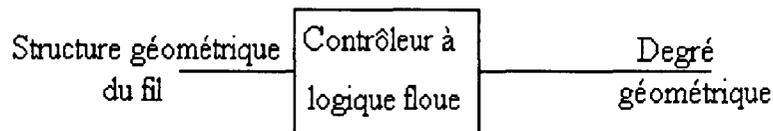


Figure IV-2 : Synoptique de la démarche à suivre pour expliciter la diffusion

IV-1 / RAPPELS SUR LA LOGIQUE FLOUE

IV-1-1 / Introduction

La résolution de certains problèmes pratiques passe par l'élaboration de modèles de plus en plus complexes. Une grande partie des données caractérisant ces modèles est souvent inaccessible sous la forme de nombres précis et définitifs (météo, trafic routier,...) ce qui handicape un traitement purement symbolique.

Par ailleurs, les données et information recueillies sont souvent imprécises, incohérentes ou incomplètes pour plusieurs raisons, les plus importantes sont :

- l'imperfection des instruments de mesures (précision, étalonnage,...),
- les renseignements obtenus par un opérateur humain (fatigue, nervosité,...).

Non seulement la précision est inaccessible à la mesure, mais encore il y a des situations où elle s'avère peu utile, voire difficilement interprétable. C'est le cas

lorsqu'on analyse le fonctionnement d'un système complexe, ou de grande dimension. Un modèle agrégé fournit parfois une information plus assimilable qu'un modèle détaillé, et donc plus adapté aux problèmes pratiques.

En présence de connaissances incertaines ou imprécises, nous pouvons soit :

- ne pas tenir compte des imperfections,
- les conserver en raison de l'information qu'elles contiennent.

La solution la plus satisfaisante réside dans une préservation des imperfections jusqu'à un certain niveau qui permet de ne pas perdre une information intéressante, mais de parvenir à une représentation facilement manipulable de façon automatique.

Ainsi La logique floue, qui est une extension de la logique classique pour raisonner sur des connaissances imparfaites, est née en 1965 des travaux de Lotfi A. Zadeh qui a eu l'idée de formaliser la représentation et le traitement de connaissances imprécises ou approximatives à fin de pouvoir traiter des systèmes d'une grande complexité [ZAD 65].

La logique floue apporte alors une souplesse qui permet de caractériser les relations entre l'espace des entrées et l'espace des sorties pour les systèmes complexes ou pour les systèmes qui n'ont pas de modèles analytiques.

IV-1-2 / Caractéristiques de la logique floue [MEU 95]

La logique floue est basée sur des propositions. Ces propositions sont floues et définies à partir d'un ensemble noté L de variables linguistiques et d'un ensemble noté M de modificateurs. La valeur de vérité de ces propositions appartient à l'intervalle $[0,1]$. Cette valeur de vérité est appelée aussi degré d'appartenance. Elle est donnée par une fonction d'appartenance de la caractérisation floue utilisée dans la proposition floue.

Une valeur de vérité égale à 1 correspond à une proposition floue absolument vraie, alors qu'une valeur de vérité égale à 0 correspond à une proposition floue absolument fausse. Les quantificateurs et les qualificatifs qui sont principalement utilisés dans la logique floue sont :

- Les quantificateurs flous : "généralement", "dans la plupart des cas",...
- Les qualificatifs de vérité : "peu vrai", "vrai", "très vrai",...
- Les qualificatifs de probabilité : "peu probable", "probable", "très probable",...
- Les qualificatifs de possibilité : "peu possible", "possible", "très possible",...

Dans un cas particulier où toutes les propositions floues sont booléennes, la logique floue est identique à la logique classique.

IV-1-3 / Conditions et domaines d'utilisation

Il est intéressant d'utiliser la logique floue lorsque des imperfections entachent les connaissances que nous avons sur un système, une modélisation rigoureuse de celui-ci est difficile ou bien lorsque notre façon naturelle de l'aborder passe par une vue globale de certains de ces aspects.

La logique floue doit être considérée comme un outil de plus à ajouter à la panoplie des outils disponibles (programmation linéaire, contrôleur P.I.D, programmation non linéaire...). Elle ne doit en aucun cas être considérée a priori comme l'unique moyen qui doit apporter une solution à la réalisation d'une application, cependant il convient de se demander si la réalisation à effectuer présente des caractéristiques de manière à ce que la logique floue soit intéressante.

Généralement, les raisons qui peuvent conduire à l'utilisation de la logique floue sont :

- Les connaissances concernant le système à réaliser sont imparfaites,
- Certaines de ces connaissances sont exprimées avec des termes du langage naturel, par un expert ou un observateur humain, et d'autres sont fournies numériquement par des instruments d'observations,
- Il existe des connaissances graduelles sur le système,
- Une grande flexibilité est recherchée dans le système à réaliser.

Les domaines d'utilisation de la logique floue sont variés. Elle peut être utilisée dans les systèmes experts, les décisions multicritères, le traitement d'images, les décisions de groupes, la robotique,...

IV-1-4 / Principe du contrôleur à logique floue

IV-1-4-1 / Définitions [MEU 95]

- **Sous ensemble flou** : Le concept de sous ensemble flou a été introduit pour éviter les passages brusques d'une classe à une autre. Ceci autorise des éléments à n'appartenir complètement ni à l'une ni à l'autre.

Définition: Un sous ensemble flou A de X est défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de X , un degré $f_A(x) \in [0,1]$ avec lequel $x \in A$. Le sous ensemble flou A est caractérisé par son :

- * **Support** : Le support de A est le sous ensemble de X sur lequel la fonction d'appartenance n'est pas nulle.

- * Hauteur: La hauteur de A est le plus fort degré avec lequel un élément de X appartient à A . Lorsque la hauteur de A est égale à 1, on dit que A est normalisé.
 - * Cardinalité : Lorsque X est fini: Elle est définie par $|A| = \sum_{x \in X} f_A(x)$.
 - * Noyau : Le noyau de A est l'ensemble des éléments de X pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1.
- Partition floue : Une partition floue d'un ensemble X est une famille finie de sous ensembles flous normalisés (F_1, F_2, \dots, F_p) de fonctions d'appartenance f_1, f_2, \dots, f_p définies sur X telle que pour tout $x \in X \exists F_i$ satisfaisant $f_i(x) \neq 0$.
 - Normes et Conormes triangulaires : Ces opérateurs sont introduits dans le domaine des espaces métriques aléatoires [MEN 42] et on fait appel à eux lorsque des opérations habituelles comme les opérations d'intersections, d'union et de complémentarité de sous ensembles flous ne s'avèrent pas satisfaisantes dans la logique floue ou la commande de processus.
 - * norme triangulaire : Une norme triangulaire (t-norme) est une fonction $T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ qui vérifie pour tout u, v et w appartenant à $[0,1]$ les conditions suivantes :
 - i) $T(u, v) = T(v, u)$ (commutativité)
 - ii) $T(u, T(v, w)) = T(T(u, v), w)$ (associativité)
 - iii) $T(u, v) \leq T(w, t)$ si $u \leq w$ et $v \leq t$
 - iv) $T(u, 1) = u$ (élément neutre 1)

La fonction min définie par $\min(x, y) = x$ si $x < y$ est une norme triangulaire.

* Conorme triangulaire : Une conorme triangulaire (t-conorme) est une fonction

$C : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ qui vérifie pour tout u, v et w appartenant à $[0,1]$

i) $C(u, v) = C(v, u)$ (commutativité)

ii) $C(u, C(v, w)) = C(C(u, v), w)$ (associativité)

iii) $C(u, v) \leq C(w, t)$ si $u \leq w$ et $v \leq t$

iv) $T(u, 0) = u$ (élément neutre 0)

La fonction max définie par $\max(x, y) = x$ si $x > y$ est une conorme triangulaire.

- Modus Ponens : Le modus ponens a été introduit en logique classique pour permettre d'obtenir automatiquement des déductions à la suite d'un raisonnement naturel. En présence d'une règle floue de la forme si " V est A alors W est B " et d'une observation de la forme " V est A' ", la conclusion définie par le modus ponens généralisé est la proposition floue " W est B' ", B' ayant la fonction d'appartenance suivante :

$\forall y \in Y \quad f_{B'}(y) = \sup_{x \in X} T(f_A(x), f_R(x, y))$ pour une t-norme T qui est un opérateur d'un modus ponens généralisé.

avec :

f_R : fonction d'appartenance du couple (x, y) ,

$f_{R'}$: fonction d'appartenance de y .

IV-1-4-2-/ Méthode de raisonnement en logique floue

L'approche générale pour réaliser une commande floue passe par les étapes suivantes [MEU 95], [MAT 94]:

Première étape: Formalisation

- Nous définissons les variables impliquées. Ce sont les variables d'entrée d'une part et les variables de sortie d'autre part.

Ensuite, nous recherchons toutes les caractérisations d'une même variable et nous les représentons par des sous ensembles flous de l'ensemble de définition de la variable de telle sorte que toute situation soit envisagée.

- Des fonctions d'appartenances triangulaires ou trapézoïdales sont souvent choisies, mais d'autres types de courbes sont utilisables.

- Les règles sont alors transcrites en utilisant les descriptions flous des variables soit en liste soit en tableau résumant toutes les situations.

Deuxième étape: Obtention d'un résultat intermédiaire

Cette étape fournit une caractérisation floue pour chaque variable de commande. Elle revient à effectuer un modus ponens généralisé.

Troisième étape: Agrégation des résultats intermédiaire

Cette étape consiste à trouver une agrégation des résultats intermédiaires. Donc, pour chacune des règles donnant une caractérisation de la variable de commande en présence d'une donnée précise, nous choisissons un opérateur d'agrégation, pour déterminer une caractérisation floue à partir des résultats intermédiaire.

Ce sont généralement la t-norme et la t-conorme de Zadeh qui sont généralement choisies [MEU 95], donnant un résultat agrégé de la fonction d'appartenance tel que:

$$\forall y \in Y f_{A(B'_1, B'_2, \dots)}(y) = \max_{i=1,2,\dots} f_{B'_i}(y) \text{ ou } \forall y \in Y f_{A(B'_1, B'_2, \dots)}(y) = \min_{i=1,2,\dots} f_{B'_i}(y)$$

Quatrième étape: Defuzzification

Cette étape consiste à déduire une action de commande du résultat agrégé flou. Soit B la caractérisation précise du résultat agrégé W . B est de forme $B = \{y_0\}$ et sa fonction d'appartenance f_B vaut 1 en un point y_0 de Y et 0 partout ailleurs.

Pour déterminer y_0 , plusieurs méthodes sont disponibles. Nous pouvons citer à titre indicatif : la méthode du centre de gravité, le maximum, le maximum moyen, le milieu des maxima, le premier maximum, la méthode des hauteurs, la méthode des aires...

Il est à noter que le choix de la méthode permettant de déterminer un résultat non flou ne doit pas être fait indépendamment de celui de l'implication flou utilisée à la deuxième étape.

IV-1-5 / Principales méthodes

Plusieurs méthodes floues peuvent être utilisées pour aboutir à la modélisation floue désirée, les principales méthodes sont essentiellement réparties en trois groupes, le premier, regroupe l'approche logique qui ne favorise aucune implication floue, le choix de l'implication floue est laissé à l'opérateur qui décide d'utiliser une implication parmi celles de Zadeh qui convient le mieux à son système. Le second groupe est formé par les méthodes de Mamdani et de Larsen. La méthode Mamdani est historiquement la première à être proposée [MAM 74], elle est simple à mettre en place, comme celle de Larsen [LAR 80]. Toutes les deux sont des méthodes logiques particulières, reposant sur le choix de la t-norme de Zadeh pour celle de Mamdani et de la t-norme probabiliste pour celle de Larsen. Le troisième groupe contient une approche complètement différente, Cette approche est utilisée dans le cas où les fonctions d'appartenance caractérisant les variables dont les règles sont monotones. Pour plus de détails sur les différentes méthodes, voir annexe logique floue.

IV-1-6 / Méthode utilisée (Sugeno)

Dans notre application, nous avons besoin d'une sortie constante, nous avons alors choisi de travailler avec la méthode Sugeno [SUG 85] qui ressemble à la méthode Mamdani, sauf que les méthodes d'implications et d'agrégations sont fixées. L'implication utilisée est une multiplication alors que l'opérateur d'agrégation inclus tous les singletons des fonctions floues de sortie.

Les avantages de cette méthode sont :

- traitement informatique efficace,
- bons résultats avec des techniques linéaires (P.I.D. ...),
- bons résultats avec les méthodes d'optimisations et les méthodes adaptatives,
- très grande adaptabilité aux analyses mathématiques.

Cette méthode est déjà programmée sur le logiciel Matlab que nous avons utilisé dans le cadre de cette étude. Il suffit de définir les fonctions floues d'entrées et de sortie, d'écrire les règles pour qu'on ait directement la sortie de chaque ensemble de variables d'entrées.

IV-2 / DEFINITION DU DEGRE DE DISTRIBUTION GEOMETRIQUE LIE A LA DIFFUSION (D_{GEO})

$D_{géo}$ est une valeur définie sur l'intervalle $[0, 1]$, permettant de caractériser la distribution géométrique du fil. A une position donnée du fil, l'évolution de la variation géométrique des interstices est caractérisée par la valeur de $D_{géo}$. Si cette valeur s'approche de zéro, la variation géométrique correspondant à cette position est faible par rapport à certains critères (surface, forme,...). Par contre, si cette valeur s'approche de 1, la variation géométrique est grande.

Une coupe étant un ensemble d'interstices interconnectés, l'évaluation de $D_{géo}$ sur cette coupe revient à calculer pour chaque interstice appartenant à cette coupe un degré de variation géométrique noté $d_{géo}$ qui lui même caractérise la diffusion du liquide de cet interstice à travers deux coupes successives. A travers les différentes coupes, l'une des opérations suivantes peut s'effectuer sur un interstice : fusion, scission, disparition, apparition ou reproduction (cf. chapitre II). Pour chaque type d'évolution, conformément à la diffusion du liquide dans un fil, la valeur de $d_{géo}$ est calculée selon les règles floues définies à partir des observations humaines (Suivant les cas d'évolutions, nous appelons les degrés géométriques : $d_{rep}, d_{dif}, d_{sci}, d_{app}$ ou d_{dis}) [FAY 97].

Dans les paragraphes suivants, nous étudions chaque cas d'évolution de l'interstice séparément.

IV-2-1 / Reproduction d'un interstice

La diffusion du liquide dans un fil est fortement liée aux facteurs suivants :

- la variation de la surface de l'interstice,
- le déplacement de l'interstice,
- la valeur de la connexion externe.

Ces trois variables sont les entrées du contrôleur de logique floue alors que $d_{géo}$ est sa sortie.

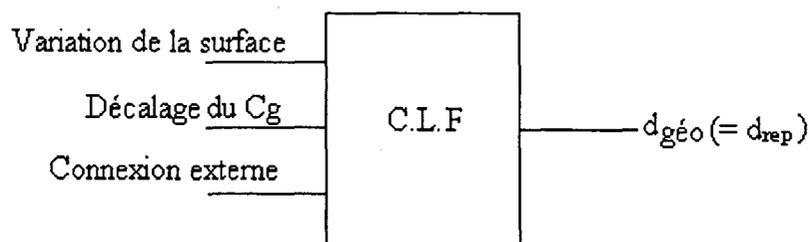


Figure IV- 3 : Représentation des entrées et de la sortie du système flou

IV-2-1-1 / Fonctions d'entrées du système flou (Fuzzification des entrées)

Par définition, les variables floues peuvent appartenir à une ou plusieurs classes. Nous avons choisi de travailler avec des fonctions d'inférences trapézoïdales et triangulaires, ce qui permet avec un choix judicieux des intervalles d'appartenance d'avoir la meilleure précision possible.

Les entrées du système flou sont en nombre de trois, nous allons définir pour chaque entrée les sous ensembles flous dont chacune est associée.

Entrée n°1 : Cette entrée est relative à la variation de la surface des interstices. D'après le suivi des interstices réalisé dans le chapitre II, nous avons constaté que la surface de l'interstice varie suivant les coupes, nous attribuons à cette variation une relation qui exprime le degré de variation de la surface.

Soit S_1 la surface d'un interstice dans la coupe initiale et S_2 la surface de l'interstice qui correspond au successeur de S_1 dans la coupe suivante, la variation de surface peut appartenir à l'un des trois cas suivants :

* cas n°1 : $\frac{S_2}{S_1} < 1$ La surface de l'interstice diminue,

* cas n°2 : $\frac{S_2}{S_1} = 1$ La surface de l'interstice ne varie pas,

* cas n°3 : $\frac{S_2}{S_1} > 1$ La surface de l'interstice augmente.

En logique classique, chaque cas correspond à un intervalle bien défini ce qui n'est pas le cas en logique floue (car la variable d'entrée peut appartenir à la fois à deux cas). Nous déterminons alors pour chaque variable d'entrée ses fonctions d'appartenances (floues) correspondantes. Dans ce qui suit, nous allons définir et

expliquer les fonctions d'appartenances associées à l'entrée $\frac{S_2}{S_1}$. La figure IV-4, illustre les fonctions floues associées à l'entrée $\frac{S_2}{S_1}$.

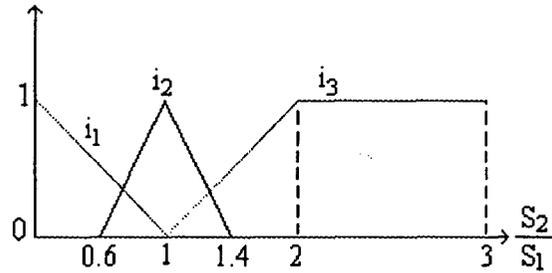


Figure IV-4 : Définition des sous ensembles flous correspondant à l'entrée 1

Le sous ensemble flou i_1 correspond au cas n°1 où $\frac{S_2}{S_1} < 1$. Ce sous ensemble est triangulaire décroissant jusqu'à ce que la valeur $\frac{S_2}{S_1}$ est égale à 1, à partir de cette position sur l'axe $\frac{S_2}{S_1}$, il devient nul.

Ce choix a été fait pour exprimer la valeur d'appartenance de la variable $\frac{S_2}{S_1}$ à l'intervalle $[0, 1]$; la fonction d'appartenance associée au sous ensemble i_1 est continue, elle permet de faire une graduation linéaire de la variable d'entrée. Avec cette fonction, plus l'entrée $\frac{S_2}{S_1}$ est inférieure à 1 plus sa valeur d'appartenance à l'intervalle $[0, 1]$ est grande et plus l'entrée $\frac{S_2}{S_1}$ est proche de 1 plus son degré d'appartenance à ce même intervalle est faible.

La fonction d'appartenance associée au sous ensemble flou i_2 correspond au cas où $\frac{S_2}{S_1}$ est proche de 1, $\frac{S_2}{S_1}$ peut être inférieure ou supérieure à 1. Ceci nous a amené à choisir une fonction d'appartenance floue triangulaire ayant un sommet à la valeur

$\frac{S_2}{S_1}=1$, alors que la base de cette fonction est comprise entre les valeurs $\frac{S_2}{S_1}=0.6$ et $\frac{S_2}{S_1}=1.4$. Ces valeurs ont été choisis en se basant sur les tableaux d'évolution des surfaces entre les coupes successives (c'est à dire les caractéristiques des interstices cf. annexes). Avec ce choix, nous considérons que si la valeur d'entrée $\frac{S_2}{S_1}=0.7$ ou si $\frac{S_2}{S_1}=1.3$, cette entrée peut appartenir au cas n°2. Il est bien évident que si la valeur de $\frac{S_2}{S_1}$ est très proche de 1 alors sa valeur d'appartenance au cas n°2 est voisine de 1, ce qui exprime la certitude qu'elle appartient à ce cas.

La fonction d'appartenance associée au sous ensemble floue i_3 correspond au cas n°3 où $\frac{S_2}{S_1} > 1$, cette fonction est trapézoïdale, elle est formée de trois segments de

droite, le premier est un palier nul allant de la valeur $\frac{S_2}{S_1}=0$ à celle où elle est égale à 1.

Le deuxième segment est une portion de droite croissante allant de $\frac{S_2}{S_1}=1$ à $\frac{S_2}{S_1}=2$, ce segment correspond au doute émis sur la valeur de la variable $\frac{S_2}{S_1}$ à être supérieure à 1.

A partir de la valeur $\frac{S_2}{S_1}=2$, le doute sur cette variable est complètement dissipé. Avec

la fonction i_3 , plus la variable $\frac{S_2}{S_1}$ est supérieure à 1 plus sa valeur d'appartenance au cas n°3 est grande.

Entrée n° 2 : Cette entrée est relative au déplacement de l'interstice. Nous avons remarqué que le centre d'inertie de l'interstice peut représenter ce déplacement. Etudier le déplacement de l'interstice revient en quelque sorte à étudier le déplacement de son centre d'inertie. Or dans une même coupe du fil PET à 88 monofilaments, les interstices ont des dimensions très différentes, le déplacement des interstices est alors calculé par rapport à leurs dimensions.

$L_{\max}(I)$ étant la largeur maximale de l'interstice I, le déplacement de l'interstice est calculé par rapport à la moitié de la largeur maximale. Nous appelons ce déplacement le décalage de l'interstice.

$$\text{Décalage} = \frac{2 * |Cg_{i+1} - Cg_i|}{l_{\max}(i)}$$

avec:

Cg_i : Centre de gravité de l'interstice I dans la coupe initiale,

Cg_{i+1} : Centre de gravité de l'interstice I dans la coupe suivante.

A partir de plusieurs observations et constatations relatives à cette entrée (données sous forme d'hypothèses un peu plus loin), notre choix sur les fonctions floues à été arrêté sur les fonctions d'appartenances j_1 , j_2 et j_3 données par la figure IV-5.

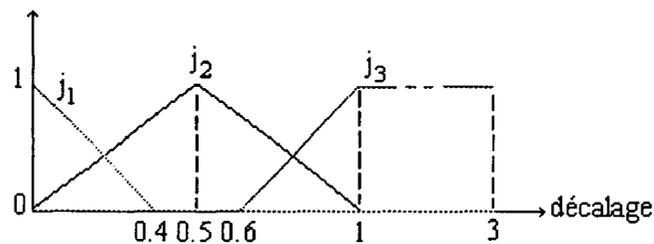


Figure IV-5 : Valeurs floues correspondant au décalage

Entrée n°3 : Cette entrée représente la valeur de la connexion externe, elle est calculée en pixels. Etant donné que le diamètre d'un monofilament est égale à 26 pixels et que la connexion entre deux monofilament est égale à la distance qui les sépare, nous considérons que :

- la connexion est faible lorsqu'elle est inférieure au diamètre d'un monofilament,
- la connexion est forte lorsqu'elle dépasse le double du diamètre.

Les fonctions d'appartenances relatives à cette entrée sont données par la figure IV-6, ces fonctions ont été choisies après plusieurs observations données sous forme d'hypothèses dans le paragraphe suivant.

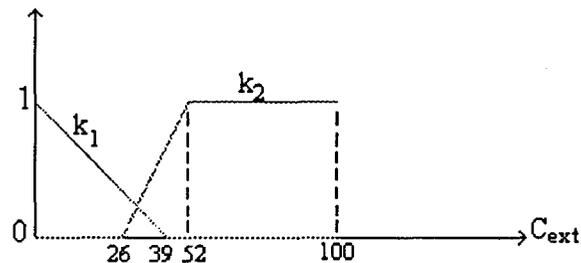


Figure IV-6 : Fonctions floues relatives à la connexion externe

IV-2-1-2 / Hypothèses de diffusion

Dans ce qui suit nous allons définir les règles qui permettent de définir $d_{\text{géo}}$.

- ➔ H_1 - lorsque la surface de l'interstice grandit, le liquide se propage facilement donc sa diffusion augmente.
- ➔ H_2 - lorsque la surface de l'interstice se rétrécit, le liquide se propage difficilement donc sa diffusion diminue.
- ➔ H_3 - lorsque la surface de l'interstice ne varie pas, la propagation du liquide est moyenne ce qui donne une diffusion moyenne.

Ces trois premières hypothèses peuvent être schématiser ainsi :

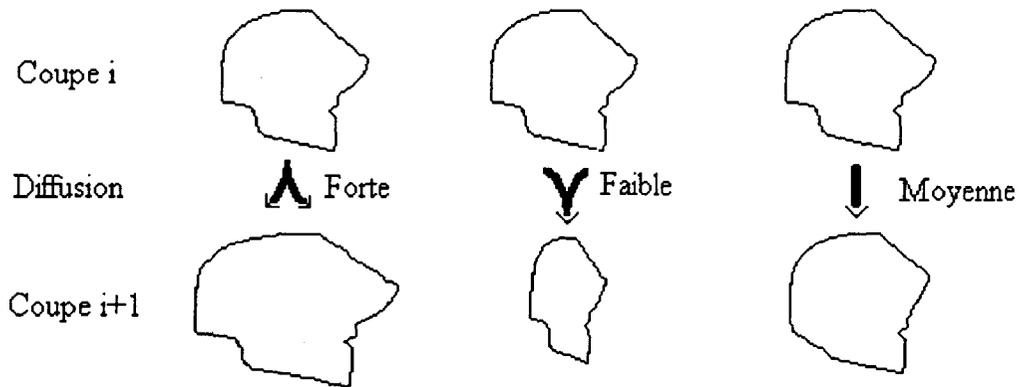


Figure IV- 7 : Hypothèses relatives à la variation de la surface

➔ H₄- lorsqu'il y a un décalage entre le centre de gravité de l'interstice de la coupe initiale et celui de la coupe suivante la vitesse du liquide diminue.

Nous discutons alors les 3 cas suivants :

- le décalage est nul la diffusion du liquide est importante,
- le décalage est moyen la diffusion du liquide est moyenne,
- le décalage est important la diffusion du liquide est très faible.

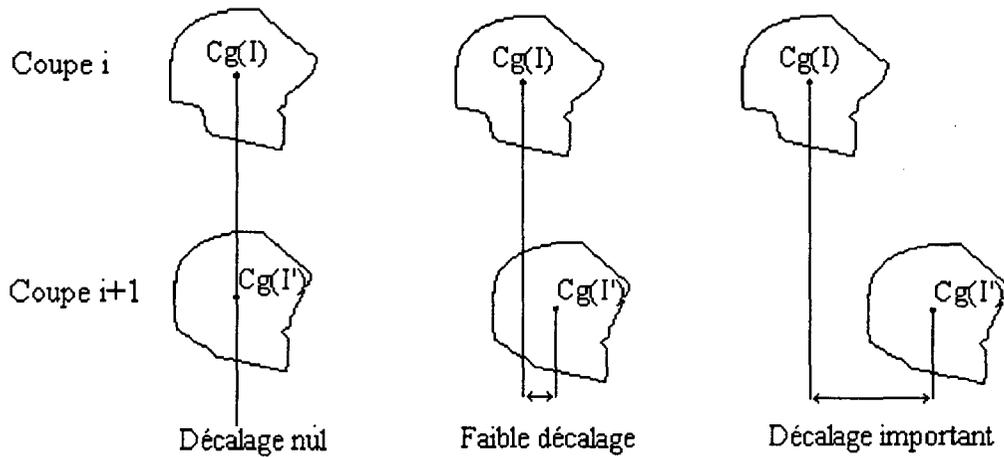


Figure IV-8 : Hypothèse relative à la variation du centre de gravité

➔ H₅- lorsque la connexion externe de l'interstice est assez importante le liquide se propage plus difficilement. Ce fait est du à la saturation de l'interstice par le liquide venant de la connexion externe.

Les hypothèses H_1 à H_5 sont les hypothèses qui expliquent, à notre avis, le caractère géométrique de la diffusion.

Sachant qu'on peut attribuer à la sortie les valeurs 0 pour faible, 0.5 pour moyenne et 1 pour forte, nous pouvons déterminer à partir des valeurs des caractéristiques des interstices la valeur descriptive d de la diffusion du liquide à l'intérieur de cet interstice.

Ainsi, nous obtenons les règles suivantes :

1. si le déplacement est nul et $S_2 \ll S_1$ alors $d=0$,
2. si le déplacement est nul et $S_2 = S_1$ alors $d=0.5$,
3. si le déplacement est nul et $S_2 \gg S_1$ et C_{ext} est faible alors $d=1$,
4. si le déplacement est moyen et $S_2 \ll S_1$ alors $d=0$,
5. Si le déplacement est moyen et $S_2 = S_1$ alors $d=0$,
6. Si le déplacement est moyen et $S_2 \gg S_1$ alors $d=0.5$,
7. Si le déplacement est important alors $d=0$.

IV-2-2 / Fusion de deux interstices

Trois possibilités peuvent se présenter cf. figure IV-9:

- les deux interstices sont connectés,
- les deux interstices ne sont pas connectés mais ils ont au moins deux monofilaments en commun,
- les deux interstices ne sont pas connectés et ont au plus un monofilament en commun.

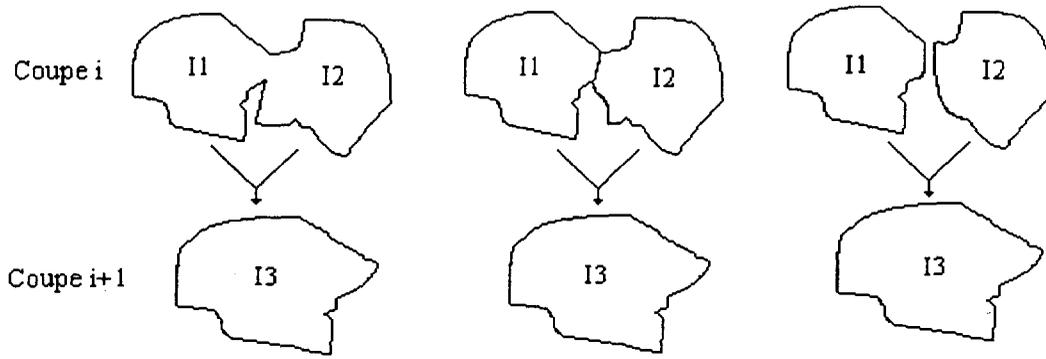


Figure IV-9 : Différentes possibilités de fusion de deux interstices

Nous appelons :

$Depl_1$: la distance entre le centre de gravité de I1 et le centre de gravité de I3,

$Depl_2$: la distance entre le centre de gravité de I2 et le centre de gravité de I3,

C_{int} : la connexion entre I1 et I2,

S_1 : la surface de I1, S_2 la surface de I2.

Lorsque l'intersection entre I1 et I2 est au plus égale à un monofilament, on n'a pas de connexion interne ($C_{int} = 0$).

Lorsque l'intersection entre I1 et I2 est au moins égale à deux monofilaments, C_{int} est égale à la distance maximale entre deux monofilaments consécutifs appartenant à l'intersection.

Les entrées du contrôleur de logique floue sont au nombre de cinq. Soient S_1 , S_2 , $Depl_1$, $Depl_2$ et C_{int} ces entrées. Leurs fonctions d'appartenances sont données par la figure IV-10.

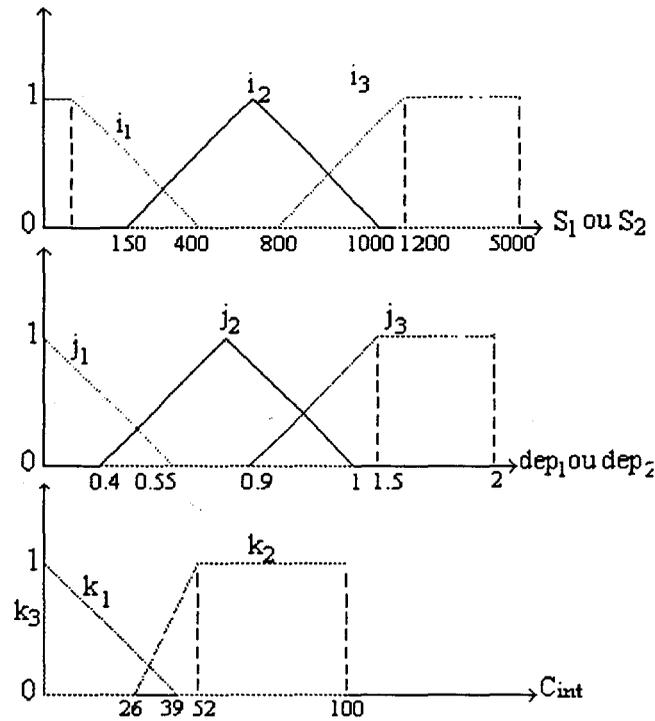


Figure IV-10: Fonctions d'appartenances liées à la fusion

A partir des constatations et observations faites sur les différentes coupes du fil de polyester, nous formulons les hypothèses suivantes :

- ➔ H_1 : la diffusion est importante lorsque la connexion interne est grande.
- ➔ H_2 : la diffusion est moyenne lorsque la connexion interne est moyenne.
- ➔ H_3 : la diffusion est faible lorsqu'il n'y a pas de connexion.

Nous avons constaté aussi que la diffusion dépend du déplacement des interstices. Si le déplacement de I_1 est inférieur au déplacement de I_2 et la surface de I_1 est supérieure à la surface de I_2 nous avons un degré de fusion important.

- ➔ H_4 : si le déplacement de I_1 est inférieur au déplacement de I_2 et la surface de I_1 est inférieure à la surface de I_2 on a un degré de fusion moyen.
- ➔ H_5 : si le déplacement de I_1 est supérieur au déplacement de I_2 et la surface de I_1 est supérieure à la surface de I_2 on a un degré de fusion moyen.

➔ H_6 : si le déplacement de I_1 est supérieur au déplacement de I_2 et la surface de I_1 est inférieure à la surface de I_2 on a un degré de fusion important.

A partir de ces hypothèses, nous définissons les règles suivantes :

- 1- Si C_{int} est nulle alors $d_{fus}=0$,
- 2- Si C_{int} est faible et $depl1 < depl2$ et $S1 > S2$ alors $d_{fus}=0.5$,
- 3- Si C_{int} est faible et $depl1 < depl2$ et $S1 < S2$ alors $d_{fus}=0.5$,
- 4- Si C_{int} est faible et $depl1 > depl2$ et $S1 < S2$ alors $d_{fus}=0.5$,
- 5- Si C_{int} est faible et $depl1 > depl2$ et $S1 > S2$ alors $d_{fus}=0.5$,
- 6- Si C_{int} est forte et $depl1 < depl2$ et $S1 > S2$ alors $d_{fus}=1$,
- 7- Si C_{int} est forte et $depl1 < depl2$ et $S1 < S2$ alors $d_{fus}=0.5$,
- 8- Si C_{int} est forte et $depl1 > depl2$ et $S1 < S2$ alors $d_{fus}=0.5$,
- 9- Si C_{int} est forte et $depl1 > depl2$ et $S1 > S2$ alors $d_{fus}=1$.

IV-2-3 / Scission d'un interstice

Comme dans le cas précédent, nous avons trois cas d'évolution :

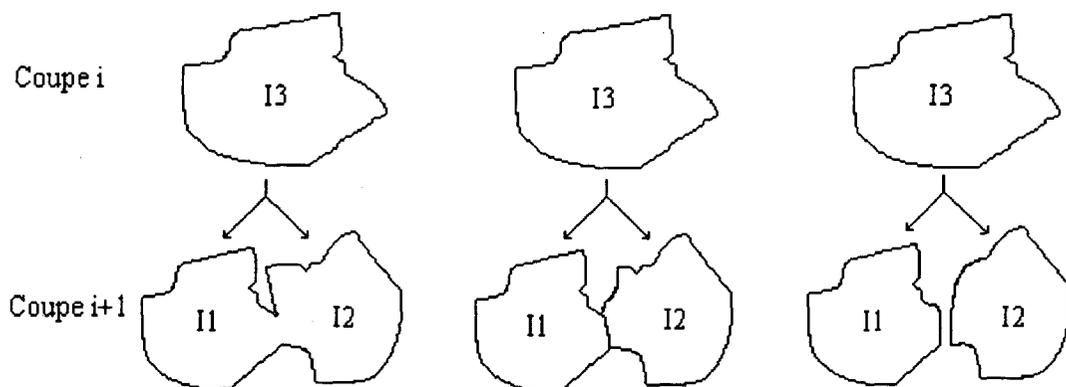


Figure IV-11 : Différentes possibilités de Scission

La scission implique la formation de deux interstices, de ce fait, deux chemins de diffusion sont à prévoir, un par rapport à l'interstice I_1 l'autre par rapport à l'interstice I_2 . Nous prenons d_{sc} égale à la valeur minimale des deux diffusions. Les fonctions d'appartenances floues relatives à ce cas d'évolution des interstices sont données par la figure IV-12.

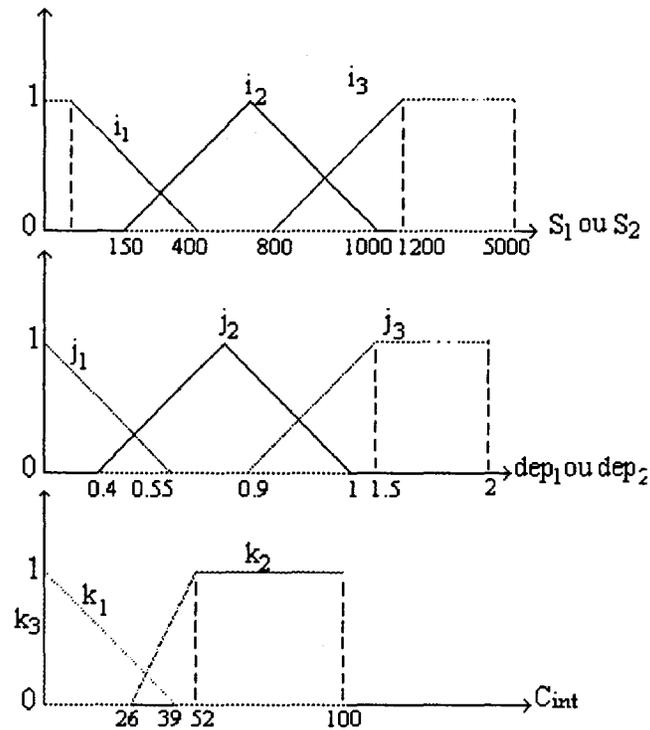


Figure IV-12 : Fonctions d'appartenances relatives à la Scission de deux interstices

Nous formulons les hypothèses suivantes :

- ➔ H_1 : la diffusion est importante lorsque la connexion est grande.
- ➔ H_2 : la diffusion est moyenne lorsque la connexion est moyenne.
- ➔ H_3 : la diffusion est faible lorsqu'il n'y a pas de connexion.

La valeur du déplacement dépend de la largeur maximale de la surface d'origine. Nous supposons alors que lorsque la valeur du déplacement est supérieur à la moitié de la largeur maximale, nous avons un décalage important des deux surfaces et la diffusion est faible.

Nous supposons alors que :

➔ H_4 : si $depl1 > L_{max}/2$ et $depl2 > L_{max}/2$ on a $d1 = 0$ et $d2 = 0$ donc $d_{sc}=0$.

➔ H_6 : si $depl1 > L_{max}/2$ et $depl2 < L_{max}/2$ on a $d1 = 0$ et $d2 = 1$ donc $d_{sc}=0$.

➔ H_7 : si $depl1 < L_{max}/2$ et $depl2 > L_{max}/2$ on a $d1 = 1$ et $d2 = 0$ donc $d_{sc}=0$.

➔ H_8 : si $depl1 < L_{max}/2$ et $depl2 < L_{max}/2$ on a $d1 = 1$ et $d2 = 1$ donc $d_{sc}=1$.

Les règles retenues sont alors :

1.si $depl1 > L_{max}/2$ et $depl2 > L_{max}/2$ et $\forall C_{int}$ on a alors $d_{sc}=0$,

2.si $depl1 > L_{max}/2$ et $depl2 < L_{max}/2$ et $C_{int} = 0$ on a alors $d_{sc}=0$,

3.si $depl1 > L_{max}/2$ et $depl2 < L_{max}/2$ et C_{int} est faible on a alors $d_{sc}=0$,

4.si $depl1 > L_{max}/2$ et $depl2 < L_{max}/2$ et C_{int} est forte on a alors $d_{sc}=0$,

5.si $depl1 < L_{max}/2$ et $depl2 > L_{max}/2$ et $C_{int} = 0$ on a alors $d_{sc}=0$,

6.si $depl1 < L_{max}/2$ et $depl2 > L_{max}/2$ et C_{int} est faible on a alors $d_{sc}=0$,

7.si $depl1 < L_{max}/2$ et $depl2 > L_{max}/2$ et C_{int} est forte on a alors $d_{sc}=0$,

8.si $depl1 < L_{max}/2$ et $depl2 < L_{max}/2$ et $C_{int} = 0$ on a alors $d_{sc}=0$,

9.si $depl1 < L_{max}/2$ et $depl2 < L_{max}/2$ et C_{int} est faible on a alors $d_{sc}=0.5$,

10.si $depl1 < L_{max}/2$ et $depl2 < L_{max}/2$ et C_{int} est forte on a alors $d_{sc}=1$.

REMARQUE

Les intervalles des différentes fonctions d'appartenances ont été choisis par essais successifs, à partir des tableaux de valeurs des différentes caractéristiques des interstices (cf. Annexes).

IV-2-4 / Disparition ou apparition d'un interstice

Nous associons à un interstice qui disparaît une valeur de diffusion d_{dis} telle que $d_{dis} = 0.5$.

De même, nous associons à un interstice qui apparaît une valeur de diffusion d_{app} telle que $d_{app} = 0.5$.

IV-3 / DEFINITION DU DEGRE DE DIFFUSION A TRAVERS LES COUPES SUCCESSIVES

Supposons que dans une coupe, nous avons :

- n surfaces qui se sont reproduits,
- 2m surfaces qui ont fusionné,
- l surfaces qui se sont divisées en deux,
- p surfaces qui ont disparu,
- q surfaces qui sont apparues.

Nous calculons les degrés de reproduction, de fusion, de scission, d'apparition et de disparition de cette coupe.

Le degré de reproduction est définie par :

$$D_{rep} = \sum_{i=1}^n (w_{rep})_i \cdot (d_{rep})_i \text{ avec } \sum_{i=1}^n (w_{rep})_i = 1$$

$(w_{rep})_i$ est un coefficient de pondération de l'interstice (i). C'est le rapport de la surface de l'interstice (i) sur la totalité des surfaces des interstices qui se sont reproduits.

De même, nous calculons :

$$D_{fus} = \sum_{i=1}^m (w_{fus})_i \cdot (d_{fus})_i \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^m (w_{fus})_i = 1$$

$$D_{sci} = \sum_{i=1}^l (w_{sci})_i \cdot (d_{sci})_i \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^l (w_{sci})_i = 1$$

$$D_{app} = \sum_{i=1}^q (w_{app})_i \cdot (d_{app})_i \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^q (w_{app})_i = 1$$

$$D_{dis} = \sum_{i=1}^p (w_{dis})_i \cdot (d_{dis})_i \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^p (w_{dis})_i = 1$$

Cette coupe est donc définie par les degrés $(D_{rep}, D_{dif}, D_{sci}, D_{app}, D_{dis})$. Nous définissons alors le degré de diffusion géométrique associé à cette coupe que nous appelons aussi degré de suivi de la coupe D_{geo} par :

$$D_{geo} = a_{rep} \cdot D_{rep} + a_{fus} \cdot D_{fus} + a_{sci} \cdot D_{sci} + a_{app} \cdot D_{app} + a_{dis} \cdot D_{dis}$$

Avec $(a_{rep}, a_{fus}, a_{sci}, a_{dis}, a_{app})$ des coefficients de pondérations, un choix judicieux de ces coefficients nous permet d'apporter une correction au modèle que nous définissons, pour se rapprocher des résultats expérimentaux cf. chapitre III. Ces coefficients traduisent l'influence de chaque phénomène d'évolution sur la diffusion du liquide [FAY 98].

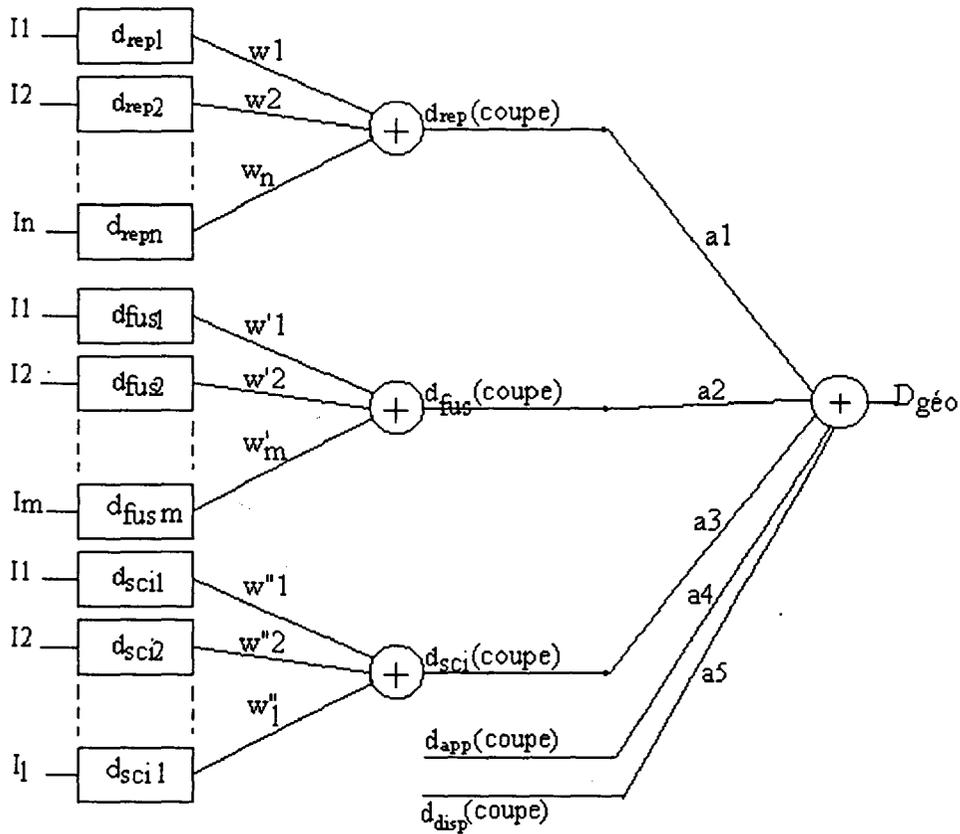


Figure IV-13 : Contrôleur de logique floue utilisé

IV-4 / CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons utilisé les résultats mesurés à partir des images de coupes ($S_2/S_1, C_{g1}, C_{g2}, L_{max}, \dots$) afin de caractériser la distribution géométrique à une position donnée du fil. A partir de l'expérience de mouillage, certaines hypothèses ont été proposées afin de relier les résultats géométriques à la diffusion du liquide dans un fil. De cette manière, la valeur de $D_{géo}$ est calculée à partir des règles floues résultants de ces hypothèses.

Dans ce qui suit, nous allons, dans une première partie, définir et expliquer la méthode retenue pour simuler la diffusion du liquide à travers le fil polyester à partir des résultats obtenus par la modélisation.

Dans une deuxième partie, nous allons chercher à étudier les effets des paramètres du modèle, en comparant les résultats trouvés par ce modèle et les résultats obtenus expérimentalement.

CHAPITRE V

SIMULATION DE LA DIFFUSION DU LIQUIDE DANS UN FIL

SIMULATION DE LA DIFFUSION DU LIQUIDE DANS UN FIL

Dans le chapitre II, nous avons présenté les matrices de passage entre les coupes successives (paragraphe II-2-3-3-2). Ces matrices associées aux positions des centres de gravité des interstices permettent d'obtenir une visualisation statique du fil (réseau de capillaires) cf. figure V-1. Le réseau est représenté en trois dimensions. Deux axes représentent le plan perpendiculaire à l'axe du fil et le troisième représente la position et la direction longitudinale des coupes.

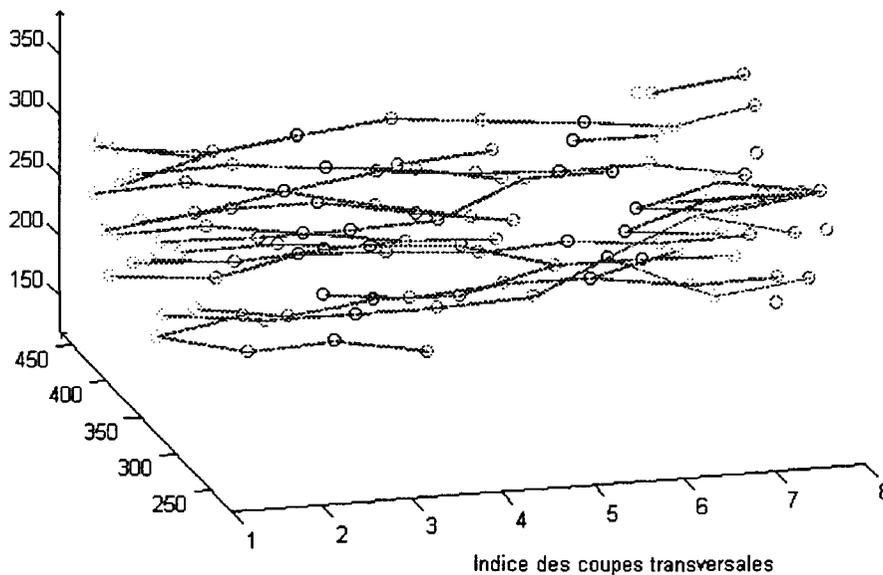


Figure V-1 : Représentation statique du réseau de capillaire du fil

A la sortie des contrôleurs à logique floue (cf. figure IV-13), nous avons obtenu des valeurs (d_{rep} , d_{fus} , d_{sci} , d_{dis} , d_{app}) caractérisant la distribution géométrique des monofilaments dans le fil de polyester. Ces valeurs ont été définies dans le sens de vitesse de mouillage. Ainsi la moyenne pondérée de ces degrés ($D_{géo}$) permet de

simuler la vitesse moyenne de diffusion relative à la coupe correspondante. Le principe de la simulation consiste à appliquer cette vitesse simulée à l'entrée du réseau de capillaire (modèle statique du fil), à visualiser la diffusion du liquide et à calculer ensuite les distances (hauteurs) atteintes par le liquide dans le fil à différents instants. La distance (hauteur) moyenne obtenue par simulation est ensuite comparée à celle trouvée expérimentalement.

V-1 / PROCEDURE DE SIMULATION

V-1-1 / Variables de simulation

Aux matrices de passage nous associons plusieurs variables de simulation afin d'obtenir une visualisation dynamique de la diffusion.

A chaque coupe (n), nous associons une variable booléenne indiquant si elle est active (s'il y a une diffusion entre la coupe (n) et la coupe (n+1), ou non). Le vecteur de booléens correspondant à l'ensemble des coupes est noté I. Ce vecteur est défini par :

$$I=[f(1), f(2), \dots, f(n)]^T$$

avec

n : indice de la coupe et $\forall n, f(n) = 1$ si la diffusion entre la coupe n et la coupe n+1 est en cours, et $f(n)=0$ si la diffusion est terminée ou n'est pas encore entamée.

Un exemple de vecteur I est présenté ci-dessous :

Indice des coupes 1 2 3 4 5 6 7

Etat des coupes	1	1	0	0	0	0	0
-----------------	---	---	---	---	---	---	---

Exemple V-1 : Vecteur I représentant l'état des coupes.

Dans l'exemple V-1, les coupes 1 et 2 sont actives tandis que les coupes 3 à 7 sont inactives. Il y a donc diffusion entre les coupes 1 et 2 et les coupes 2 et 3.

Une coupe x est considérée comme inactive c'est à dire $f(x)=0$ si:

- la diffusion n'a pas encore atteint le niveau de cette coupe.
- le passage du liquide à travers cette coupe à déjà eu lieu.

Il est tout à fait attendu que plusieurs coupes peuvent être actives en même temps, tout comme au sein d'une même coupe certains interstices peuvent être actifs et d'autres non. C'est pourquoi nous associons à chaque coupe x un vecteur temporel noté t_x (cf. Exemple V-2) et dont chaque élément $t_x(i)$ est associé à l'interstice d'indice i .

Sur la coupe x , pour $i=1...m$ où m est le nombre d'interstices appartenant à cette coupe. t_x est défini par :

$$t_x = [t_x(1), t_x(2), t_x(3), \dots, t_x(m)]^T$$

$t_x(i)$ est le temps qui s'est écoulé depuis le début de la diffusion dans l'interstice i .

Grâce aux valeurs contenues dans ce vecteur, on calcule la distance d parcourue par le liquide entre deux interstices $d = \text{vitesse} \times t$ où la vitesse est considérée égale à $D_{\text{géo}}$.

L'exemple V-2 présente un vecteur temporel associé à la coupe x .

Numéro des interstices	1	2	3	.	.	.	.	.	n
Valeur de t associée	0.2	0.3	0.1	.	.	.	.	.	0.5

Exemple V-2 : Vecteur temporel t_x associé à la coupe x

L'état de la diffusion dans chaque interstice dépend de ses prédécesseurs, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître l'état précis de la diffusion dans chaque interstice.

Pour avoir des paramètres corrects et pour tenir compte de toutes les conditions, nous avons défini pour chaque coupe une matrice de simulation notée $Fini_x$. Cette matrice est composée d'une part, de l'ensemble des interstices et d'autre part des caractéristiques des prédécesseurs et des successeurs de ces interstices.

Soit i un interstice de la coupe x la ligne de la matrice $Fini_x$ associée à l'interstice i est définie par:

- $Fini_x(i,1)$: état de l'interstice (actif ou non).
- $Fini_x(i,2)$ et $Fini_x(i,3)$: indices des interstices appartenant à la coupe $(x-1)$ dont le successeur dans la coupe x est i .
- $Fini_x(i,4)$ et $Fini_x(i,6)$: indices des interstices de destination de i , c'est à dire le successeur de i dans la coupe $x+1$.
- $Fini_x(i,5)$ et $Fini_x(i,7)$: état de la diffusion de l'interstice.

On peut alors représenter la matrice $Fini_x$ de la coupe x comme suit:

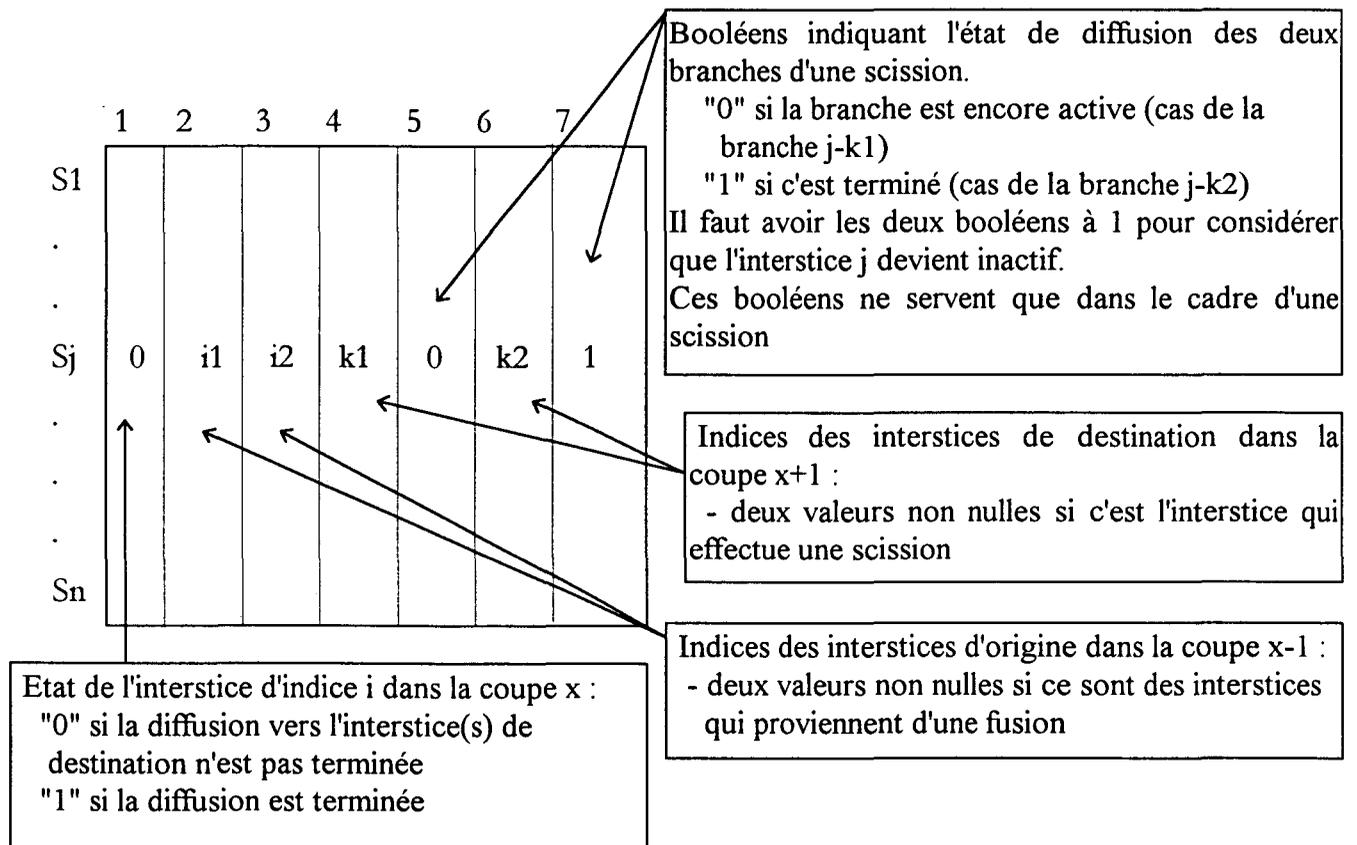


Figure V-2: Matrice de simulation dynamique $Fini_x$

La 1^{ère} colonne correspond à l'état de chaque interstice : elle contient soit un "0" si la diffusion n'a pas lieu au niveau de l'interstice soit un "1" si la diffusion est terminée au niveau de cet interstice.

Les colonnes 2 et 3 contiennent, quant à elles, les indices des interstices d'origines dans la coupe $x-1$:

- si on a une apparition d'un interstice p dans la coupe x , il n'y a pas d'interstice d'origine et on a $Fini_x(p,2)=Fini_x(p,3)=0$,
- s'il s'agit d'une fusion il y a deux indices non nuls,
- pour les autres cas seule la 2^{ème} colonne contient une valeur non nulle.

Les colonnes 4 et 6 contiennent les indices des interstices de destination dans la coupe $x+1$:

- si on a une disparition d'un interstice q de la coupe x dans la coupe $x+1$ il n'existe pas d'interstice de destination soit $Fini_x(q,4)=Fini_x(q,5)=0$,
- si l'interstice effectue une scission les deux valeurs sont non nulles,
- pour les autres cas seule la 4^{ème} colonne contient une valeur non nulle.

Les colonnes 5 et 7 correspondent aux états de diffusion des interstices qui effectuent une scission: on a un "1" si la diffusion est terminée vers l'interstice de destination et un "0" dans le cas contraire.

Les matrices $Fini_x$ sont ainsi mises à jour à chaque fois qu'un interstice a terminé sa diffusion ce qui donne, suivant les cas :

- si l'interstice effectue une scission on cherche l'indice de l'interstice atteint dans la coupe suivante et on place un "1" dans la colonne correspondante. Ce

n'est que si les deux branches ont fini leur diffusion que l'on considère l'interstice comme inactif et que l'on place un "1" dans la 1^{ère} colonne à la ligne correspondant à cet interstice.

- pour les autres cas on place un "1" dans la 1^{ère} colonne à la ligne correspondant à l'indice de l'interstice de départ .

Exemple d'évolution dynamique d'une matrice $Fini_x$:

Soit la matrice $Fini_3$ correspondant au passage de la coupe 3 à la coupe 4 et qui regroupe tous les cas possibles. La coupe 3 contient 13 interstices.

65 secondes après le début de la diffusion ($t=65s$), la matrice $Fini_3$ est :

$S1$	0	1	0	1	0	0	0
$S2$	1	2	0	2	0	0	0
$S3$	0	3	0	3	0	0	0
$S4$	0	4	0	3	0	0	0
$S5$	0	5	0	5	0	0	0
$S6$	0	0	0	6	0	0	0
$S7$	0	7	0	7	0	0	0
$S8$	0	8	9	8	0	13	0
$S9$	1	10	0	9	0	0	0
$S10$	1	11	0	10	0	0	0
$S11$	0	12	0	4	0	0	0
$S12$	0	13	15	14	0	0	0
$S13$	1	14	0	11	0	0	0

Les interstices 1, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12 et 13 sont reproduits dans la coupe 4. L'interstice 8 provient de la fusion des interstices 8 et 9 de la coupe 2 et se scinde en deux pour former les interstices 8 et 13 dans la coupe 4. L'interstice 12 provient de la fusion des interstices 13 et 14 de la coupe 2. Les interstices 3 et 4 fusionnent pour former l'interstice 3 dans la coupe 4.

On peut voir sur cette matrice que les interstices 2, 9, 10 et 13 ont terminé leur diffusion puisqu'on a $Fini_3(2,1)=Fini_3(9,1)=Fini_3(10,1)=Fini_3(13,1)=1$.

10 secondes après le lancement de la diffusion ($t=75s$), la matrice $Fini_3$ devient:

S1	1	1	0	1	0	0	0
S2	1	2	0	2	0	0	0
S3	0	3	0	3	0	0	0
S4	0	4	0	3	0	0	0
S5	0	5	0	5	0	0	0
S6	0	0	0	6	0	0	0
S7	0	7	0	7	0	0	0
S8	0	8	9	8	0	13	1
S9	1	10	0	9	0	0	0
S10	1	11	0	10	0	0	0
S11	1	12	0	4	0	0	0
S12	0	13	15	14	0	0	0
S13	1	14	0	11	0	0	0

A cet instant les interstices 1, 2, 9, 10, 11 et 13 ont terminé leur diffusion. De plus la branche allant de l'interstice 8 à l'interstice 13 a terminé sa diffusion car $Fini_3(8,7)=1$. Cependant nous n'avons pas $Fini_3(8,1)=1$, car il faut que les deux branches de la scission soient inactives pour considérer l'interstice 8 comme inactif.

Après une nouvelle évolution correspondant à $t=85s$ nous avons :

S1	1	1	0	1	0	0	0
S2	1	2	0	2	0	0	0
S3	0	3	0	3	0	0	0
S4	1	4	0	3	0	0	0
S5	0	5	0	5	0	0	0
S6	0	0	0	6	0	0	0
S7	0	7	0	7	0	0	0
S8	1	8	9	8	1	13	1
S9	1	10	0	9	0	0	0
S10	1	11	0	10	0	0	0
S11	1	12	0	4	0	0	0
S12	0	13	15	14	0	0	0
S13	1	14	0	11	0	0	0

Après cette évolution on constate que la diffusion à partir des interstices 1, 2, 4, 9, 10, 11 et 13 est terminée. De plus la branche allant de l'interstice 8 de la coupe 3 à l'interstice 8 de la coupe 4 a également fini sa diffusion puisqu'on a $Fini_3(8,5)=1$. Comme on a les deux branches de la scission qui sont terminées on a l'interstice 8 qui est inactif soit $Fini_3(8,1)=1$.

Ces matrices permettent donc au cours du traitement de ne traiter que les interstices réellement actifs ce qui permet d'optimiser le temps de calcul de l'algorithme. Elles sont ainsi utilisées par tous les algorithmes présentés ci-après.

La diffusion du liquide correspond à un déplacement du liquide dans le fil. La méthode de détermination du déplacement est présentée ci-dessous.

V-1-2 / Simulation de la diffusion (Calcul de la distance atteinte par le liquide)

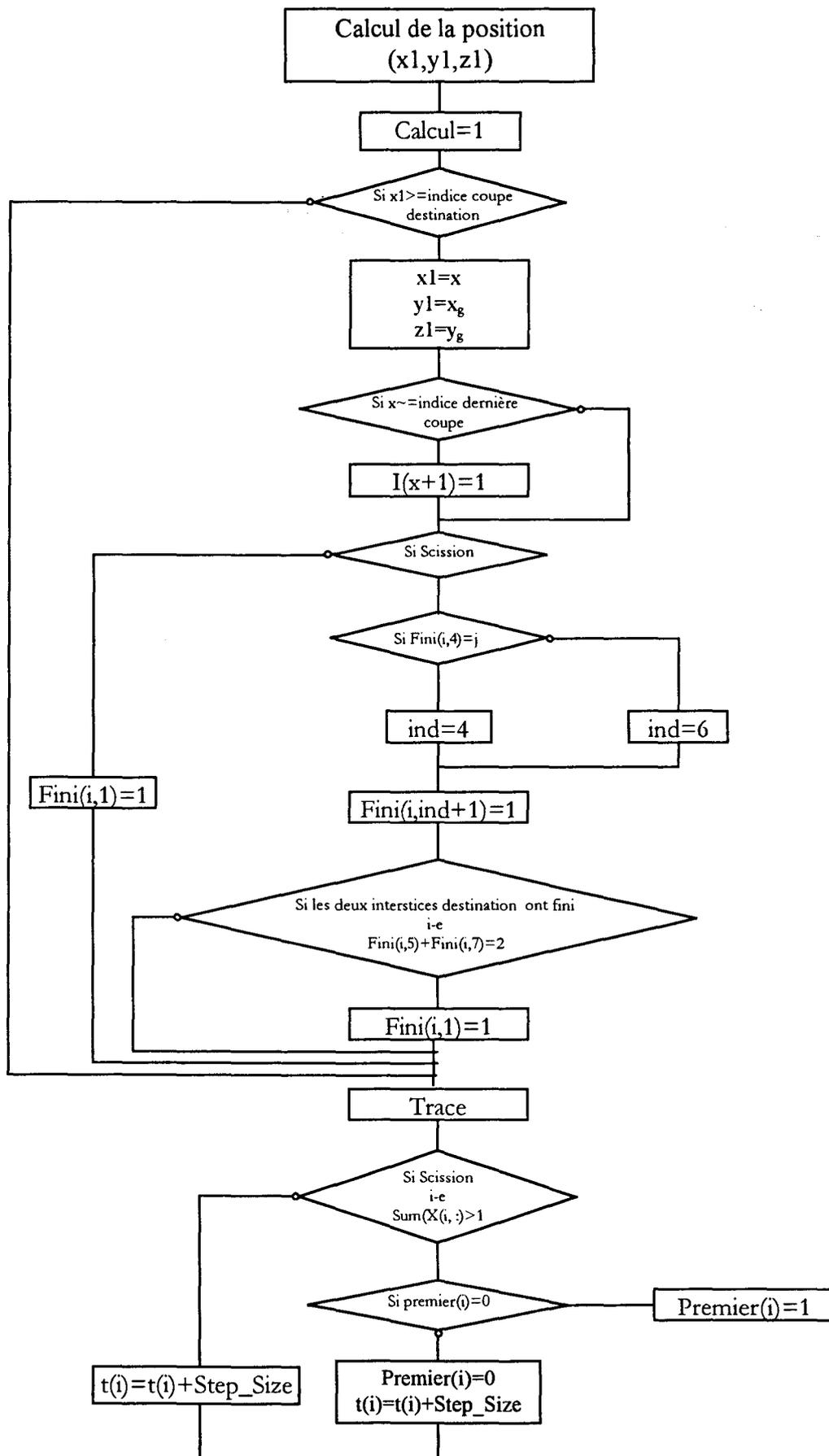
Pour un interstice i de la coupe x dont la diffusion est active, on calcule la distance parcourue durant le temps $t_x(i)$ entre les centres de gravité des interstices.

En effet les différents degrés obtenus par le modèle flou sont assimilables à des vitesses et on utilise une vitesse globale par coupe que l'on applique aux interstices d'une même coupe. On obtient donc le déplacement en calculant le produit (vitesse globale \times temps écoulé). A partir de ce déplacement on calcule la position en trois dimensions du point atteint par le liquide.

Quand la coupe suivante est atteinte par la diffusion du liquide, elle est activée en mettant son booléen à "vrai", $I(x+1)=1$. On effectue ensuite l'incrément du vecteur temporel d'un pas de calcul. Cette partie du traitement est présentée par l'organigramme V-1.

Les hauteurs ainsi calculées sont à chaque itération stockées dans une matrice notée $Hauteur_x$ contenant les indices des interstices de destination et les hauteurs atteintes par le liquide par interstice. On peut ainsi suivre d'une coupe à l'autre l'évolution des interstices.

Organigramme V-1 : Calcul de la hauteur de mouillage du liquide et mise à jour des données et des indicateurs



V-1-3 / Apparition d'un interstice :

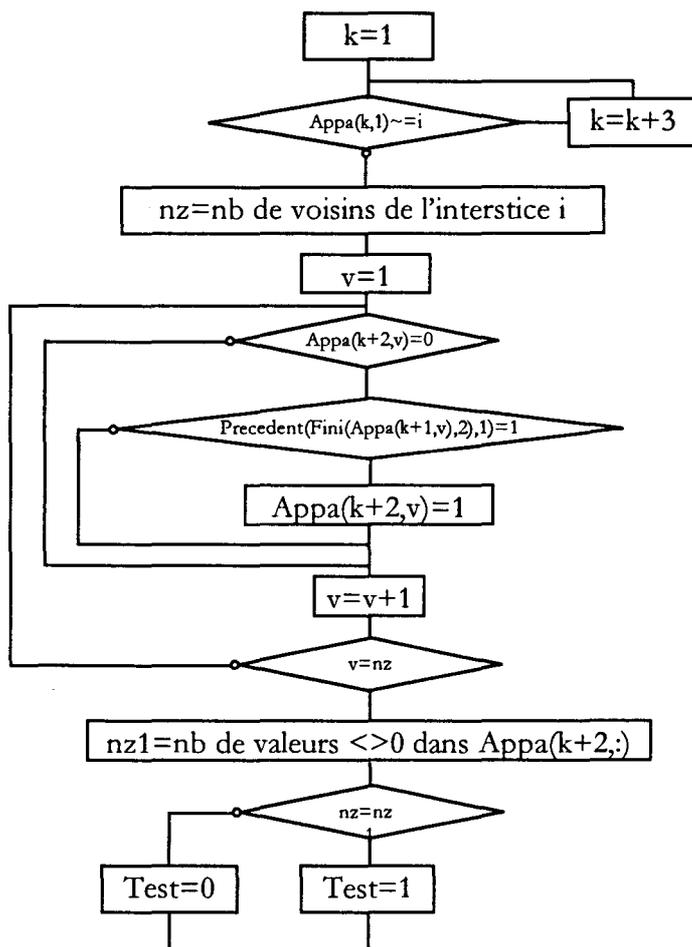
On définit un voisinage propre à chaque interstice apparaissant. Ce voisinage correspond aux interstices proches (de point de vu distance) à cet interstice apparu. Ce n'est que lorsque tout les interstices voisins ont commencé leur diffusion, que la diffusion est activée au niveau de l'interstice apparu.

On définit donc pour chaque coupe x une matrice $Appa_x$ qui contient les indices des interstices qui apparaissent dans la coupe x cf. Figure V-3.

Indice du nouvel interstice	→	i1			
Indice des interstices proches	→	j1	j2	j3	.
Etat des interstices proches	→	1	0	0	.
- "0" si la diffusion n'est pas amorcée (cas de j2 et j3)		.	.	.	.
- "1" sinon (cas de j1)		.	.	.	.

Figure V-3 : Matrice de test dans le cas de l'apparition d'un interstice

L'algorithme de test dans le cas d'une apparition est basé sur un balayage des interstices voisins afin de connaître le nombre d'interstices dont la diffusion est amorcée, ce qui revient à tester le nombre des "1" dans la ligne des états. Si ce nombre est différent du nombre de voisins de l'interstice, l'algorithme renvoie "0", et "1" dans le cas contraire cf. organigramme V-2.

Organigramme V-2 : Test des voisins lors d'une apparition**V-1-4 / Algorithme principal**

Chaque interstice ne pouvant être concerné que par un seul des cinq phénomènes d'évolution, on effectue une série de test permettant de traiter les cinq cas (cf. Organigramme V-3). On réalise une série de boucles de calcul visant à balayer pour chaque coupe les interstices actifs en calculant la position du liquide pour chaque pas de calcul et ce pour l'ensemble des coupes simultanément actives. Lorsque la diffusion du liquide à partir de l'interstice j est terminée, $Fini_x(j,1)=1$, la diffusion de l'interstice de destination est à son tour amorcée. La diffusion s'effectue donc de proche en proche entre les interstices.

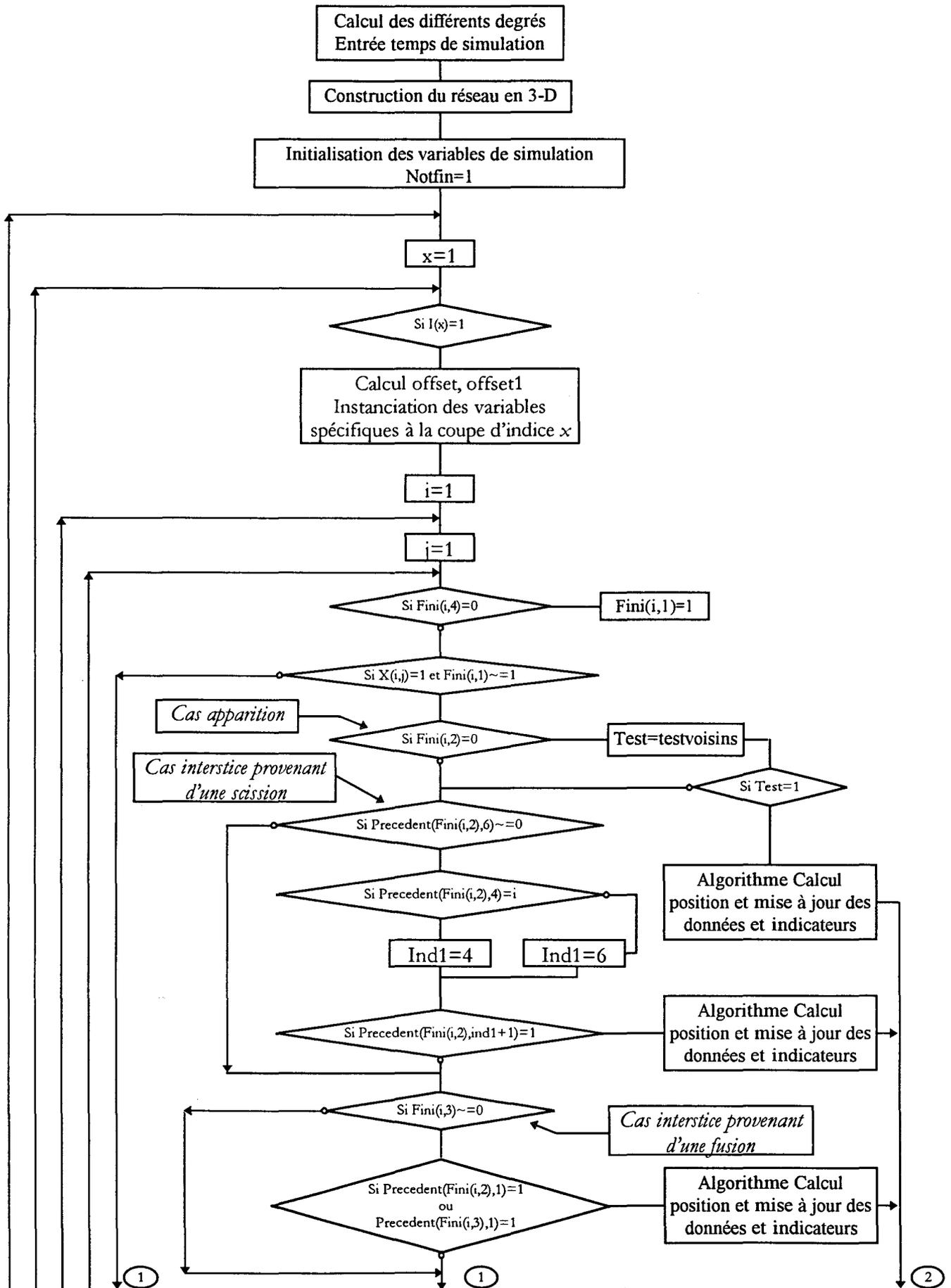
A chaque traitement d'une coupe d'indice x on réalise une instanciation des variables suivantes:

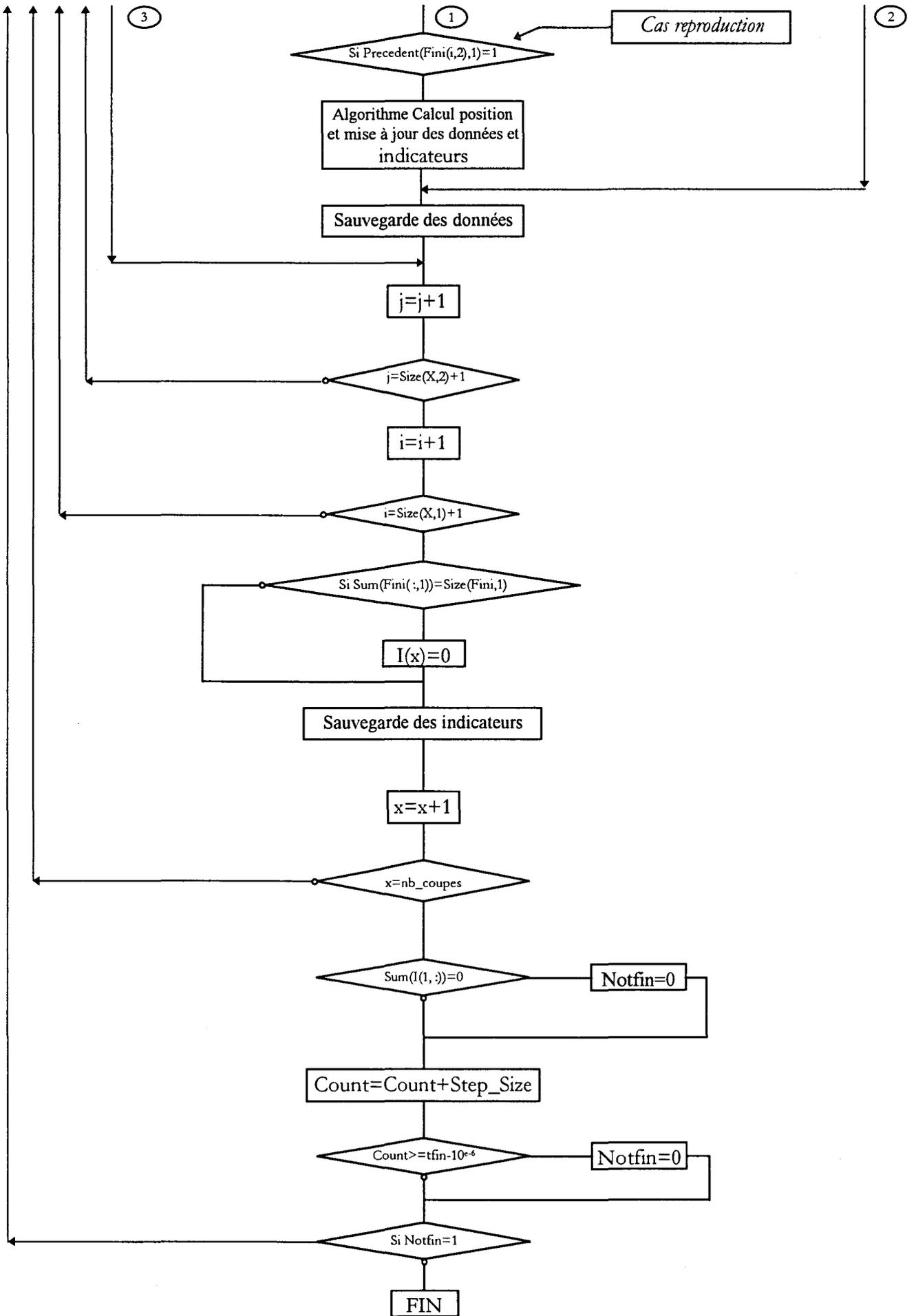
- Matrice $X=L_{x,x+1}$
- Matrice $Fini=Fini_x$
- Matrice $Hauteur=Hauteur_x$
- Vecteur $t=t_x$
- $Precedent=Fini_{x-1}$
- Matrice $Appa=Appa_x$

La simulation s'arrête dans deux cas:

- si toutes les coupes sont inactives, ce qui revient à avoir tout les éléments de I à "0", la somme des éléments de I est nulle. Soit $sum(I(:, :))=0$.
- si nous avons atteint la valeur du temps de simulation entrée en paramètre par l'utilisateur. Soit $Count=tfm$.

Organigramme V-3





Nous obtenons alors une évolution dynamique permettant de visualiser le phénomène de diffusion du liquide dans le fil cf. figure V-4.

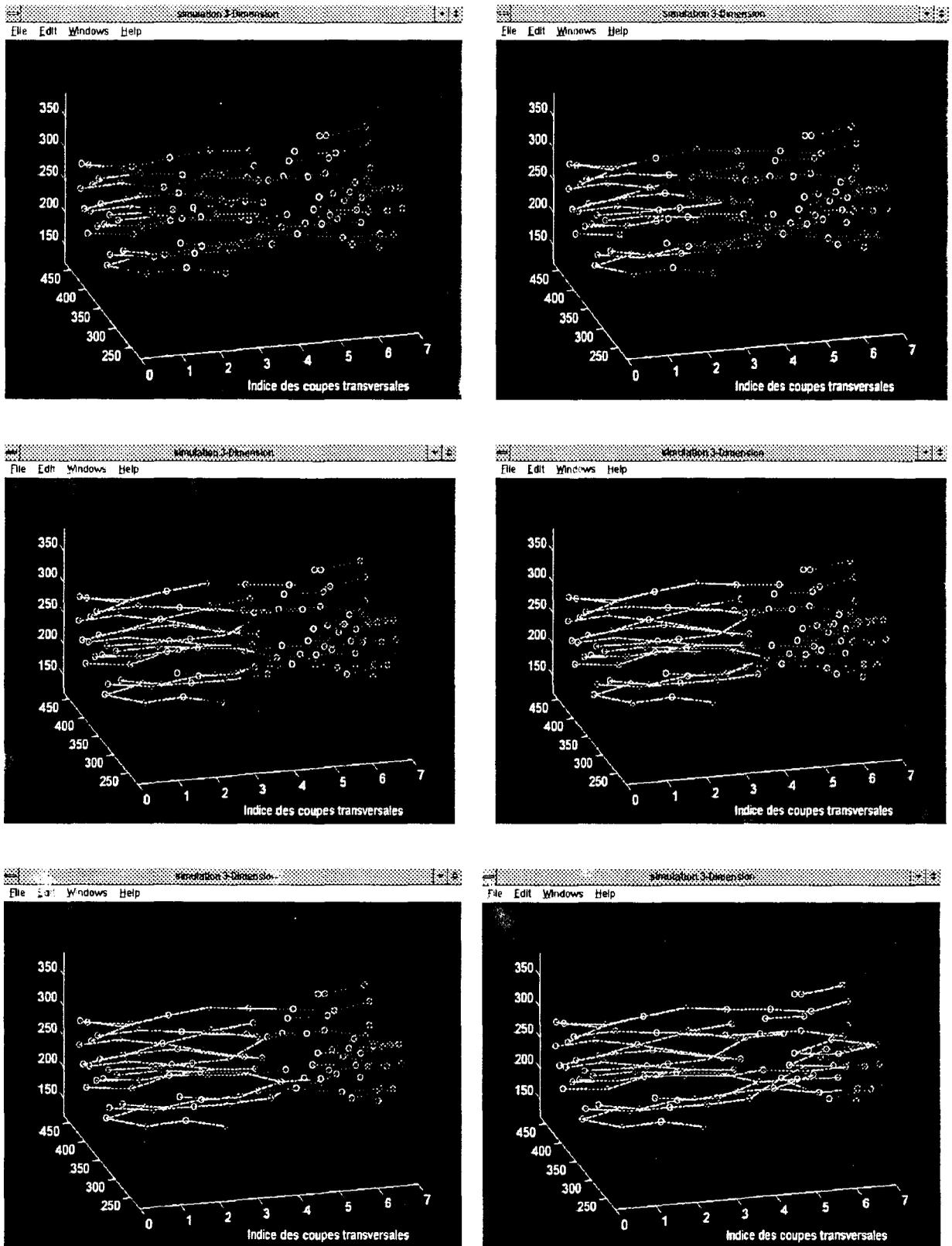


Figure V-4 : Visualisation de la diffusion du liquide par simulation à différents instants

A partir de la simulation, on effectue dès lors des relevés des hauteurs atteintes par le liquide à différents instants pour les comparer avec les résultats expérimentaux.

V-2 / RESULTATS OBTENUS A PARTIR DE LA SIMULATION

V-2-1 / Mode opératoire

En sortie des contrôleurs à logique floue, nous avons obtenu cinq degrés de diffusion D_r , D_f , D_s , D_{app} , D_{disp} . On suppose que la vitesse globale relative à une position spécifique du fil est obtenue par combinaison linéaire de ces degrés.

On appelle A la vitesse globale que l'on va appliquer à tous les interstices d'une même coupe. Vu que le degré géométrique varie d'une coupe à une autre, A représente alors un vecteur de vitesse pondérée. Les coefficients de pondération seront tout d'abord pris égaux à $1/5$ (par rapport à la coupe x on a :

$$A(x) = \frac{1}{5} \left(D_{rep}(x) + D_{fus}(x) + D_{sci}(x) + D_{app}(x) + D_{dis}(x) \right).$$

On note h_{moysim} la valeur moyenne des hauteurs atteintes sur chaque interstice et obtenues à partir de la simulation à un instant t , on trace ensuite les courbes de h_{moysim}^2 en fonction du temps et on compare le résultat obtenu avec celui obtenu expérimentalement (mis au point au chapitre III).

Les coefficients de pondérations sont ensuite affinés par minimisation de l'erreur en tenant compte de l'influence de chaque cas d'évolution de l'interstice sur la vitesse de mouillage.

V-2-2 / Procédure de simulation

On applique au réseau de capillaire, représentant la distribution des interstices dans le fil de polyester, le vecteur vitesse globale A. Ensuite, nous effectuons le relevé des valeurs des hauteurs atteintes par le liquide à différents instants cf. tableau V-1.

Interstice	Hauteur	Hauteur initiale au carrée	...	Hauteur finale au carrée
S1		$h^2_1(t_1)$	...	$h^2_1(t_k)$
.	
Si		$h^2_i(t_1)$	...	$h^2_i(t_k)$
.	
Sn		$h^2_n(t_1)$	...	$h^2_n(t_k)$
		$h^2_{moysim}(t_1) = (\sum h^2_i(t_1)) / n$	...	$h^2_{moysim}(t_k) = (\sum h^2_i(t_k)) / n$

Tableau V-1 : Résultats de simulation

On trace ensuite les courbes h^2_{moyexp} et $h^2_{moysimu}$.

Résultats

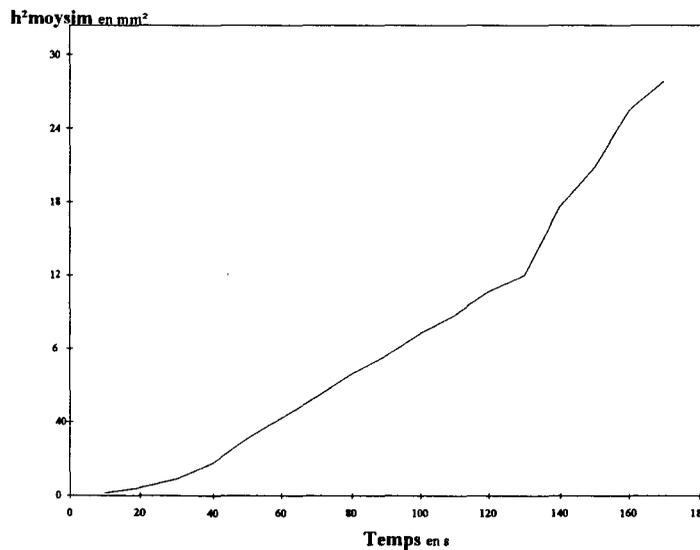


Figure V-5 : Courbe de diffusion obtenue par simulation

Cette courbe a la même allure que celle obtenue expérimentalement ce qui permet dans un premier temps d'avoir des résultats ressemblant à la réalité à partir de la simulation dynamique.

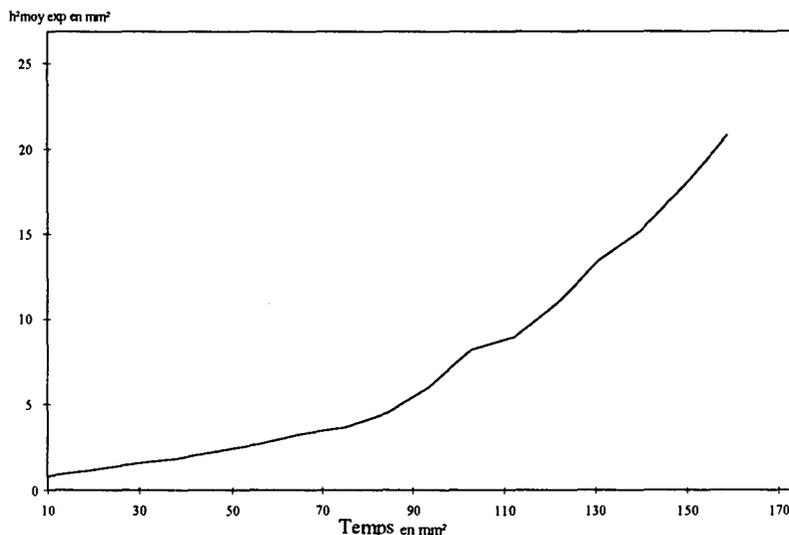


Figure V-6 : Courbe obtenue expérimentalement

Nous allons alors essayer d'améliorer ces résultats en faisant varier les valeurs des coefficients de pondérations et en calculant à chaque fois l'erreur relative. Les coefficients correspondants à la valeur de l'erreur la plus faible sont ceux qui caractérisent la portion étudiée du fil de polyester.

Effets des paramètres ($a_1=V_r$, $a_2=V_f$, $a_3=V_s$, $a_4=V_{app}$, $a_5=V_{disp}$)

L'identification des paramètres nécessite un apprentissage. La procédure d'apprentissage est définie comme suit :

- on effectue une série de simulation pour différentes valeurs des paramètres à identifier on obtient donc les données suivantes :

A(1)	↔	V _r (1)	V _f (1)	V _s (1)	V _{app} (1)	V _{disp} (1)	↔	e(1)
.	↔	↔	.
.	↔	↔	.
A(i)	↔	V _r (i)	V _f (i)	V _s (i)	V _{app} (i)	V _{disp} (i)	↔	e(i)
.	↔	↔	.
.	↔	↔	.
.	↔	↔	.
A(m)	↔	V _r (m)	V _f (m)	V _s (m)	V _{app} (m)	V _{disp} (m)	↔	e(m)

- pour chaque combinaison des paramètres V_r(i), V_f(i), V_s(i), V_{app}(i), V_{disp}(i) on obtient une valeur A(i) et une erreur e(i). Le choix des paramètres caractérisant la portion étudiée du fil polyester se fait ensuite à partir du calcul de l'erreur relative. Afin de minimiser l'écart entre la diffusion obtenue expérimentalement et la diffusion obtenue par simulation.

L'erreur relative est définie par rapport à la courbe obtenue expérimentalement, elle est présentée sous la forme suivante :

$$\varepsilon = \sum \frac{(h_{\text{moy exp}}^2(t) - h_{\text{moy sim}}^2(t))}{h_{\text{moy exp}}^2(t)}$$

Plusieurs ensembles de coefficients de pondération ont été testés pour trouver la meilleure combinaison donnant l'erreur minimale.

Dans ce qui suit nous présentons quelques exemples d'ensembles de coefficients de pondération testés, nous donnons l'ensemble de coefficients présentant l'erreur minimale en dernier lieu.

Remarque : L'étude expérimentale et l'étude à partir des coupes du fil sont faites sur la même portion. Cependant, les hauteurs atteintes expérimentalement sont légèrement inférieures à celles obtenues par la simulation. De ce fait, il nous est impossible d'affirmer que la concordance entre les courbes simulées et la courbe expérimentale est parfaite. Ceci nous a conduit à définir une translation de la courbe expérimentale sur les courbes obtenues par simulation afin d'avoir la meilleure concordance.

Pour chaque cas de simulation, nous cherchons la superposition donnant l'erreur minimale. Cette superposition donne lieu à une translation T_k . La valeur de la translation définitive qui est appliquée à la courbe expérimentale quelque soit l'erreur engendrée est la moyenne de toutes les translations obtenues.

Éléments de calcul :

Soient :

- $\left\{ \begin{pmatrix} t_i \\ h_{si} \end{pmatrix}_k, i \text{ de } 1 \mapsto p \right\}$ l'ensemble des coordonnées de la simulation n° k

- $\left\{ \begin{pmatrix} t'_i \\ h'_{ei} \end{pmatrix}, i \text{ de } 1 \mapsto p \right\}$ l'ensemble des coordonnées de la courbe expérimentale.

La meilleure superposition entre ces courbes revient à trouver $\begin{pmatrix} X_{trans} \\ Y_{trans} \end{pmatrix}_k$ telle que :

$$\sum_{i=1}^p \left(\left[\begin{pmatrix} t'_i \\ h'_{ei} \end{pmatrix} + X_{trans} \right] - \begin{pmatrix} t_i \\ h_{si} \end{pmatrix}_k \right) \text{ soit minimale.}$$

La translation définitive correspond aux coordonnées suivants :

$$\begin{cases} X_{T\text{déf}} = \frac{\sum_{j=1}^n (X_{trans})_k}{n} \\ Y_{T\text{déf}} = \frac{\sum_{k=1}^n (Y_{trans})_k}{n} \end{cases}$$

Pour commencer, nous avons choisi de travailler avec une pondération des degrés de diffusion égale et uniforme, cette procédure ne favorise pas un phénomène d'évolution sur un autre.

Remarque : Nous avons travaillé avec un liquide ayant une viscosité importante (résine epoxy), la vitesse de diffusion est par conséquent faible. Ceci nous a amené à appliquer une vitesse de simulation tenant compte de ce facteur. Dans le cas où le liquide de diffusion est peu visqueux, la vitesse de diffusion augmente sensiblement. La vitesse de simulation est multipliée par un coefficient dépendant du degré de viscosité.

Procédure 1 : A avec une pondération f_0 telle que :

$$v_r = v_f = v_s = v_{app} = v_{disp} = 1/5$$

Les résultats obtenus sont présentés sous forme d'une courbe représentant la moyenne des hauteurs atteintes au carré en fonction du temps cf. figure V-7, nous rappelons que la hauteur moyenne est la moyenne des hauteurs au même instant.

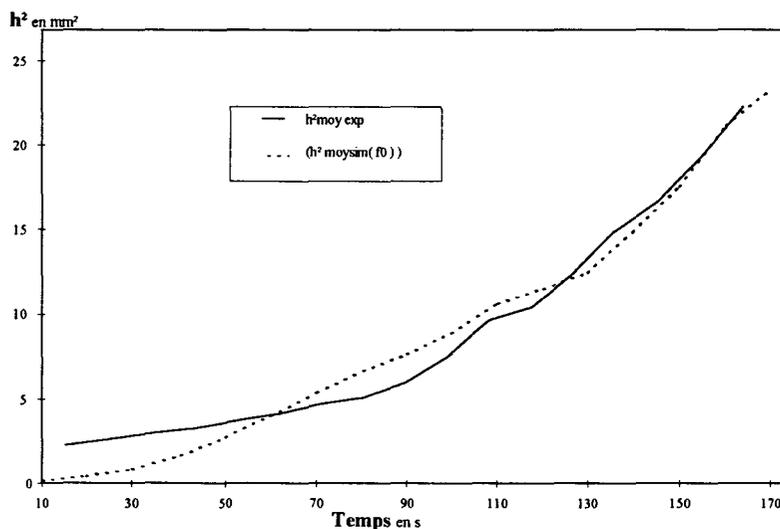


Figure V-7 : Comparaison entre la diffusion simulée avec une pondération f_0 et la diffusion expérimentale

Procédure 2 : A avec une pondération f_1 telle que :

$$v_r = 0.4$$

$$v_f = 0.15$$

$$v_s = 0.15$$

$$v_{app} = 0.2$$

$$v_{disp} = 0.1$$

On associe une valeur faible au coefficient de pondération v_{disp} car la disparition ralentit de manière importante la diffusion du liquide ce qui implique une diminution de la vitesse de diffusion, la reproduction des interstices étant le phénomène le plus couramment rencontré, il lui est a été associé le coefficient le plus fort : 0.4.

Le résultat trouvé avec cette pondération est représenté sur la figure V-8.

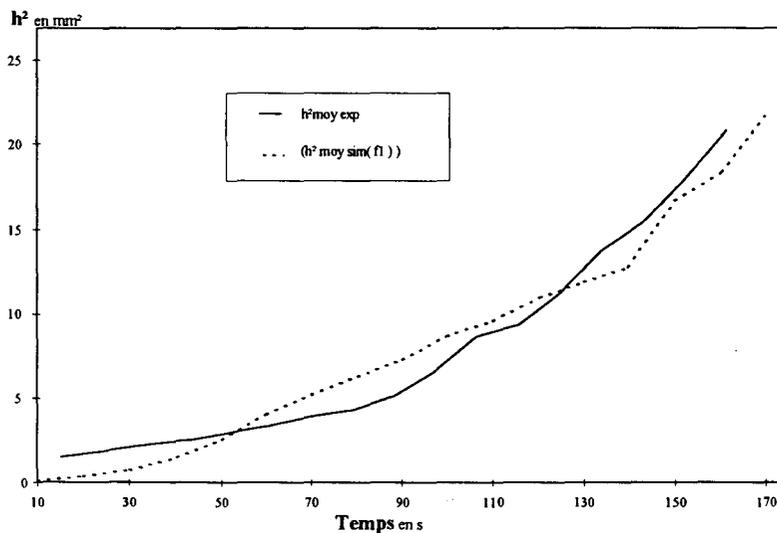


Figure V-8 : Comparaison entre la diffusion simulée avec une pondération f_1 et la diffusion expérimentale

Nous constatons que les résultats obtenus conduisent à une erreur calculée plus faible qu'avec une pondération uniforme, ceci implique forcément l'influence du

caractère géométrique et l'importance du phénomène de reproduction dans le suivi des interstices.

Nous présentons dans la procédure suivante, l'ensemble de coefficients avec lequel nous avons trouvé l'erreur minimale.

Procédure à erreur minimale : A avec une pondération f_2 telle que :

$$v_r = 0.3$$

$$v_f = 0.15$$

$$v_s = 0.1$$

$$v_{app} = 0.4$$

$$v_{disp} = 0.05$$

Nous pénalisons le phénomène de disparition mais nous considérons que l'apparition d'un interstice favorise la diffusion du liquide, l'importance du phénomène de reproduction est conservé aussi dans cet ensemble de coefficients.

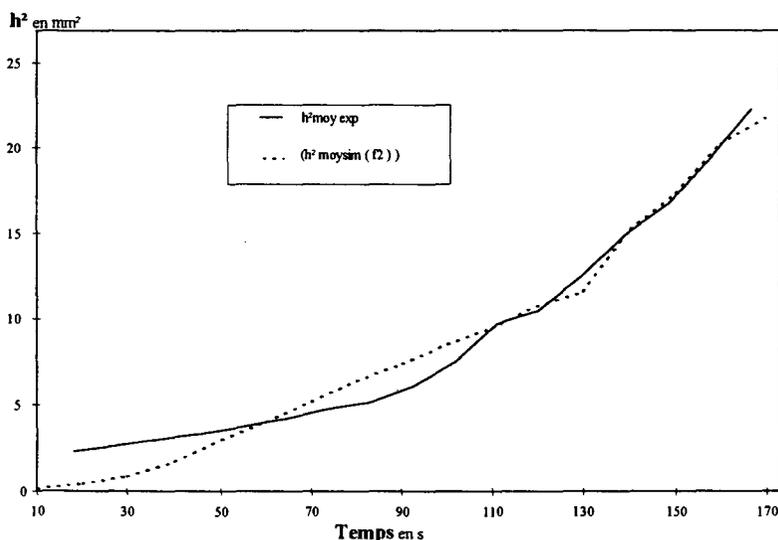


Figure V-9 : Comparaison entre la diffusion simulée avec une pondération f_2 et la diffusion expérimentale

V-2-3/ Comparaison des résultats

Les résultats obtenus pour les différents cas sont présentés au tableau suivant :

	Erreur relative
Procédure 1 : A , f0	0.44
Procédure 2 : A , f1	0.43
Procédure 3 : A , f2	0.38

Tableau V-2 : Erreurs relatives des différents ensembles de pondération.

L'erreur relative n'étant pas toujours significative, nous allons étudier la variance de chaque procédure pour la comparer à celle obtenue expérimentalement.

V-2-4 / Etude de la variance

En complément de l'étude de l'erreur relative entre les valeurs moyennes on peut également s'intéresser à l'aspect statistique en étudiant l'évolution de la variance en fonction du temps.

La variance est définie par [SPI 93]:

" soient X_1, X_2, \dots, X_n les variables aléatoires d'un échantillon de taille n . La variable aléatoire donnant la variance de l'échantillon s'exprime par :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad \text{avec } \bar{X} : \text{moyenne des } X_i$$

On trace les courbes de la variance du résultat expérimental et celles des résultats obtenus par simulation (cf. Figure V-10).

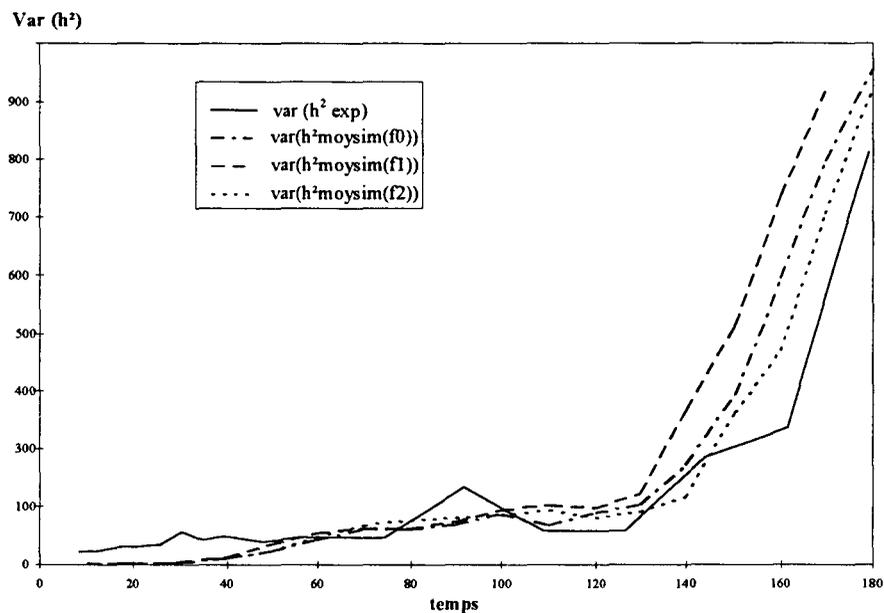


Figure V-10 : Comparaison des variances

La courbe obtenue dans chacun des cas montre que lorsque t est faible la variance est faible et plus t augmente plus la valeur de la variance devient importante. La variance des courbes de simulation a la même allure que la variance de la courbe expérimentale ce qui prouve que le modèle élaboré se rapproche du phénomène réel.

Aussi, nous constatons que le meilleur ensemble de pondération (se rapprochant au mieux de la variance expérimentale) correspond à l'ensemble de la pondération f_2 qui tient compte de l'importance et de la répétition des phénomènes d'évolution des interstices.

V-3 / VARIATIONS DUES A LA STRUCTURE GEOMETRIQUE DU FIL PET

Nous avons fait varier quelques conditions expérimentales liées au fil de polyester à 88 monofilaments, afin d'étudier leurs influences sur la distribution géométrique à l'intérieur du fil et par conséquent sur la diffusion capillaire.

V-3-1 / Variations dues à la tension du fil

En faisant varier la masse accrochée au fil, on modifie la tension qui lui est appliquée. Lorsque la tension est augmentée (masse supérieure à 25g) on remarque que les surfaces des interstices deviennent plus petites.

Deux phénomènes sont alors mis en évidence :

- lorsque la masse est inférieure à environ 40g, la vitesse de diffusion augmente. Ceci peut s'expliquer par une amplification des phénomènes capillaires (les interstices deviennent minces).
- lorsque la masse est environ supérieure à 40g, les éléments de monofilaments viennent en contact les uns avec les autres et les forces capillaires disparaissent.

V-3-2 / Variations dues à la torsion

En appliquant une torsion au fil de polyester, les interstices de celui-ci se déforment. Plus la valeur de cette torsion est importante, plus la déformation des interstices est importante, leurs surfaces sont de plus en plus petites. Les phénomènes d'évolutions de type disparition et apparition deviennent fréquents. De même dans ce cas deux phénomènes sont mis en évidence :

- lorsque la torsion du fil est inférieure à un certain seuil (50trs/m), la vitesse de diffusion augmente. Ceci peut s'expliquer par une amplification des phénomènes capillaires (les interstices deviennent uniformes).
- lorsque la torsion du fil devient importante (plus de 100trs/m), les éléments de monofilaments viennent en contact les uns avec les autres et les forces capillaires disparaissent donc la vitesse de diffusion devient faible.

V-4 / CONCLUSION

Lors de ce chapitre, nous avons présenté les moyens qui nous ont permis de simuler la diffusion d'un liquide à travers le fil PET en se basant sur les hypothèses et les résultats trouvés à partir du contrôleur à logique floue mis au point au chapitre IV.

En comparant les résultats de la simulation avec les résultats expérimentaux, nous avons constaté une très bonne concordance, surtout lorsqu'on choisit des coefficients de pondération respectant l'influence des évolutions géométriques des interstices.

L'étude de la variance des résultats simulés et des résultats expérimentaux ne fait que confirmer cette tendance.

De ce fait nous concluons que la diffusion des liquides à travers un fil PET ne subissant aucun traitement de torsion préalable est très influencé par la distribution géométrique des monofilaments dans ce fil.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le mouillage capillaire est un phénomène physique multifactoriel. Pour expliquer ce phénomène, la modélisation de la distribution géométrique des monofilaments dans un fil constitue un facteur essentiel.

Notre étude tente d'apporter une solution à la modélisation géométrique sous trois aspects :

- ☛ observation d'un ensemble de coupes successives de ce fil pour identifier les interstices constituant les pores à travers lesquels le liquide diffuse. Pour cela, un algorithme de suivi de ces interstices a été mis au point. Il permet de mettre en évidence les différents cas d'évolution géométrique des interstices : la reproduction, la fusion, la scission, la disparition et l'apparition.
- ☛ étude expérimentale de la diffusion du liquide dans le fil afin d'optimiser les paramètres du modèle, par comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.
- ☛ utilisation de la logique floue, en l'absence de modèle analytique et de théorie traitant la diffusion des liquides dans des structures multifilamentaires, afin d'établir un modèle de diffusion à partir de constatations et d'hypothèses résultant de l'observation des coupes.

Nous avons ensuite mis au point une méthode de simulation exploitant le modèle proposé, pour visualiser la diffusion du liquide. Les résultats de cette simulation ont été validés par l'expérience de mouillage.

L'étude montre que la diffusion du liquide est largement influencée par la structure géométrique interne du fil. Ceci est confirmé expérimentalement par la différence des hauteurs atteintes par le liquide dans les différentes colonnes d'une portion de fil, et corroboré par la simulation, en tenant compte de l'influence du caractère géométrique sur la diffusion.

Toutefois, cette étude présente quelques restrictions qu'il faut lever dans le futur, pour que le modèle soit général et caractérise la diffusion dans les différentes structures multifilamentaires. En effet, la recherche des interstices n'est pas entièrement automatique car elle nécessite l'intervention d'un opérateur humain. Ceci ralentit le traitement. En plus, le matériel utilisé pour réaliser les coupes ne nous permet pas d'avoir des coupes à des distances de l'ordre d'une centaine de micromètre ce qui augmenterait la précision lors de l'étude du suivi des coupes.

Nous proposons donc :

- ☛ d'améliorer la procédure de recherche des interstices, afin qu'elle détecte d'une façon entièrement automatique les différents interstices présents dans une coupe.
- ☛ d'étendre l'étude de la diffusion capillaire sur des longueurs beaucoup plus importantes, afin de mettre en évidence le caractère quasi répétitif de la distribution géométrique des monofilaments.

Enfin les méthodes présentées peuvent s'appliquer, moyennant adaptation, à des éléments autres que le textile (roche, sol, organe,...) présentant des structures micro-géométrique similaires.

**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADA 90** : A.W. ADAMSON; Physical chemistry of surfaces, 5th edition Wiley interscience, Newyork, 1990.
- AST 92** : T. ASTROM; On flow through alined fiber beds and its application to composite processing; Journal of composite materials, vol 26, n° 9, p 1351-1373,1992.
- BIN 96** : C. BINETRUY; Calcul et validation expérimentale de la perméabilité et prévision de l'imprégnation de tissus en moulage RTM; Thèse présentée à l'USTL,1996.
- BRY 93** : L.S. BRYAN, D.W. MELLOR and C.A. CADE; Physical representative network of transport in porous media; Aiche journal, p 387-396, n°3, 1993.
- CHA 91** : J.M. CHASSERY, A. MONTANVERT; Géométrie discrète en analyse d'images, p 80-90, Editions Hermés, Paris 1991.
- COM 78** : R. COMOLET; Mécanique expérimentale des fluides, 5^{ème} édition Masson , 1978.
- DAR 56** : H. DARCY; Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Paris : Dalmont, 1856.
- DAV 86** : E.R. DAVIES; Constraints on the design of template masks for edge detection; Pattern recognition letters, vol 4, n°2,p 111-120,1986.
- FAY 96** : F. FAYALA, X. ZENG and C. VASSEUR; Modelling the structure of monofilaments through successive cross section of a continuous yarn; IEEE CESA' 96 Imacs multiconference, p 78-83, July 1996, Lille, France.

- FAY 97** : F. FAYALA, X. ZENG and C. VASSEUR; Modelling the yarn geometric structure through successive cross sections; Conference international Joint Conference "The fiber society", April 21-24, 1997, Mulhouse, France.
- FAY 98** : F. FAYALA, X. ZENG and C. VASSEUR; Validation of the model of the geometric yarn structure by experiments of wettability; IEEE CESA' 98 Imacs multiconference, April 1-4, 1998, Nabeul - Hammamet, Tunisie (sous presse).
- GUI 71** : J.A. GUIN, D.P. KESSLER and R.A. GREENKORN; Physics fluids, n°14, 1971.
- KAC 89** : E. KACZMAREK; A tree partition algorithm for analysis of morphological structure of material; App. Math Modelling, p 584-589, n°10, 1989.
- KAM 94** : Y.K. KAMATH, S.B. HORNBY, H.D. WEIGMANN and M.F. WILDE; Wicking of spin finishes and related liquids into continuous filament yarn; Journal textile research, p 33-40, n°64, 1994 ;
- KEE 92** : M. KEEFE, D.C. EDWARDS and J. YANG; Solid modelling of yarn and fiber assemblies; Journal textile institute, p 185-196, n°2, 1992.
- LAN 97** : L.V. LANGENHOVE; Simulating the mechanical properties of yarn based on the properties and arrangement of its fiber : Part I : "the finite element model"; Textile research journal, p 263-268, n°4, 1997.
- LAP 06** : P.S. LAPLACE; Mécanique céleste, Suppl. Au vol X, Paris, 1906.
- LAR 80** : P.M. LARSEN; Industrial application of fuzzy logic control; Int. J. Man Machine studies, vol 12, n°1, p 3-10, 1980.
- LUC 18** : R. LUCAS; Kolloid Z, n°36, 1925.
- MAL 95** : J.H. MALCOLM, C.B. JONES and D.S. THUDOPE; Three dimensionnal reconstruction of scientific objects from serial sections; The visual computer, p 343-359, n°11, 1995.

- MAM 74** : E.H. MAMDANI; Application of fuzzy algorithm for simple dynamic plant; Proc. IEE, vol 121, n°12, p 1585-1588, 1974.
- MAT 94** : N. GULLEY and J.S.R. JANG; Fuzzy logic toolbox, 1994.
- MEL 87** : R.A. MELTER; Some characterizations of city block distance; Pattern recognition letters, p 235-240, vol 6, n°4, 1987.
- MEN 42** : K. MENGER; Statistical metrics; Proc. Nat. Aca. Sci, n°28, p 535-537, 1942.
- MEU 95** : B.B. MEUNIER; la logique floue et ses applications; Editions Addison-Wesley, France, 1995.
- MON 96** : P. MONDON; Etude de structure filamenteuses par mouillage capillaire dynamique, Thèse présentée à l'USTL, 1996.
- OHA 91** : Y. OHASHI; Three dimensionnal reconstruction of pore geometry from serial section : Image algebraic approach; Lecture notes in earth sciences, Vol 41, p 63-76, 1992.
- OLO 64** : B. OLOFSSON; Journal Textile Institute, P 541, N° 55, 1964.
- PIE 30** : F.T. PIERCE ; The Handle of cloth as a measurable quality ; Journal Textile Institute; P 377, N°21, 1930.
- PER 94** : A. PERWUELZ ; Mouillage et adhérence des fibres, Journée technologique; ENSAIT 1994.
- REA 97** : M.L. REALFF, M.C. BOYCE and S. BAKER ; A micromechanical model of the tensile behavior of woven fabric ; Textile research journal; p 445-459, n°6,1997.
- SCH 60** : A.E. SCHEIDEGGER ; The physics of flow through porous media; Univesity Toronto press; Toronto, 1960.
- SPI 93** : M.R. SPIEGEL; Statistiques : cours et problèmes, Série schaum, 1993.

SUG 85 : M. SUGENO; An introductory survey of fuzzy control, Information science, n°36, p 59-83,1985.

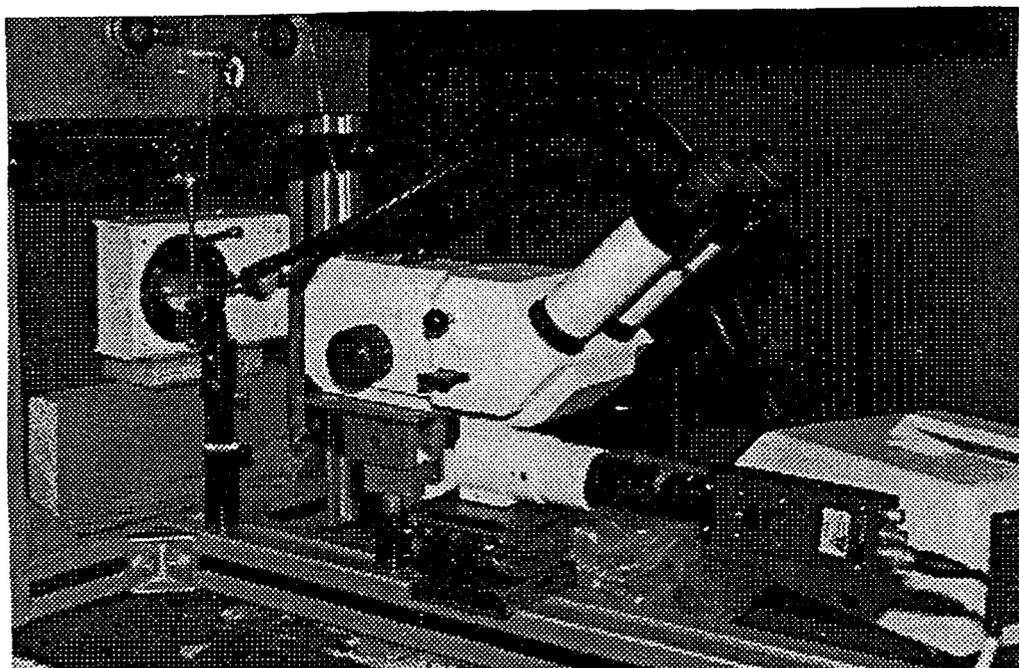
WAS 21 : E.W. WASHBURN; The dynamics of capillary flow, Physics review, n°17, p 273-283,1921.

WAT 92 : A. WATANABE, S.N. KUROSAKI and F. KONDA; Analysis of blend irregularity in yarns using image processing : Part I "Fundamental investigation of model yarns"; Textile research institute, p 690-696, n°11, 1992.

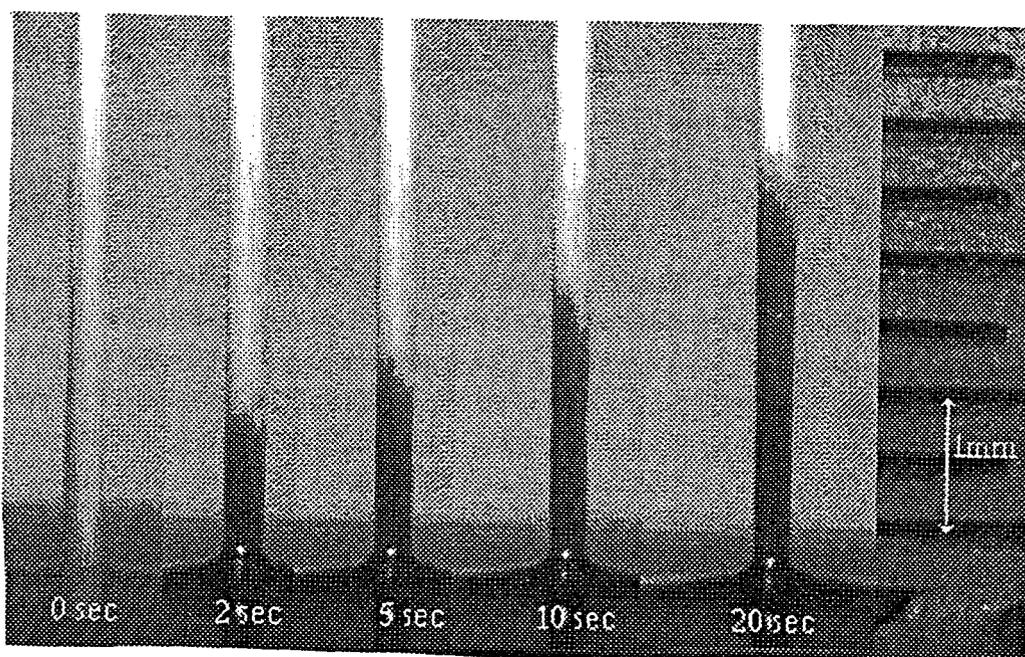
ZAD 65 : L.A. ZADEH; Fuzzy sets; Information and control, n°8, p 338-353, 1965.

ZEN 95 : X. ZENG, A. GHENAIM and C. VASSEUR; analysis of interstices of a continuous yarn by image processing technique, Proceeding of the international conference IEE / FUZZ 95, March 1995, Yokohama, Japon.

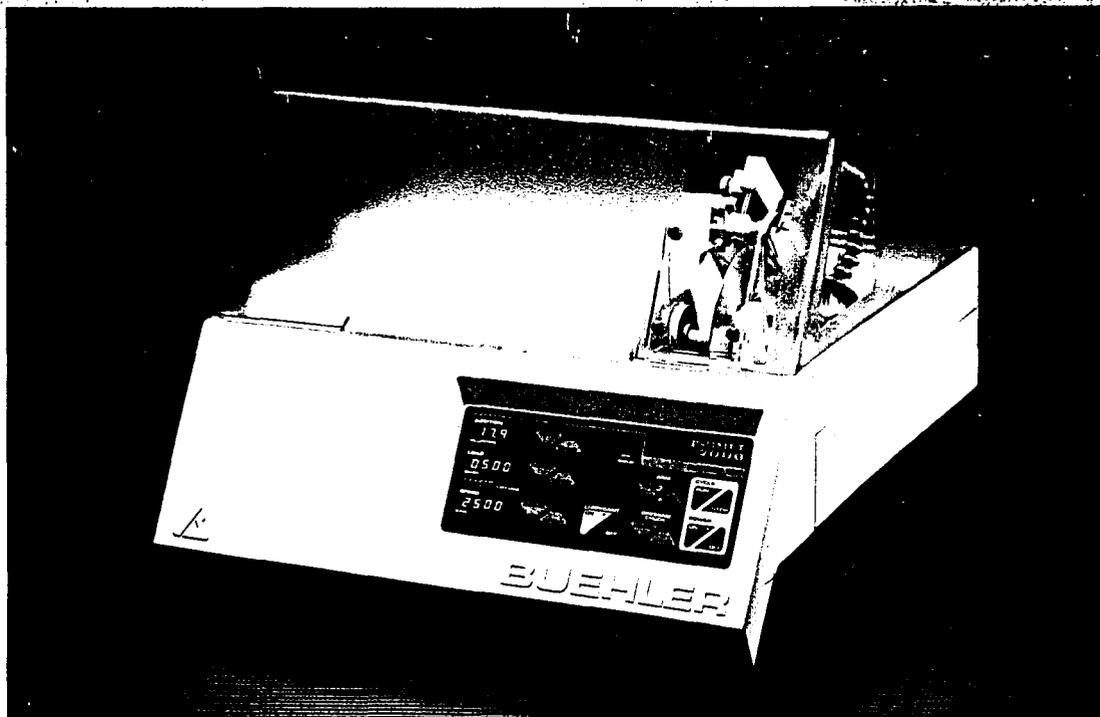
ANNEXES



Dispositif expérimental de visualisation de la diffusion du liquide



Différentes hauteurs atteintes par le liquide à t variable



ISOMET™ 2000

TROCONNEUSE
DE PRÉCISION
BUEHLER®

La précision et la réduction de déformation lors de la coupe sont des facteurs importants dans le processus de préparation et d'analyse de la plupart des échantillons microstructuraux. Partant d'une coupe propre, la préparation ultérieure sera réalisée beaucoup plus rapidement.

La Tronçonneuse de Précision ISOMET™ 2000 vous permet de sélectionner les paramètres de coupe adéquats afin de tronçonner les céramiques, composites, alliages métalliques dans des temps courts et avec un minimum de déformation. Du fait de son universalité, l'utilisation de cet appareil de laboratoire peut être étendue au tronçonnage de roches et minéraux, de composants électroniques et implants osseux ou dentaires.

La Tronçonneuse de Précision ISOMET™ 2000 présente les caractéristiques avancées suivantes :

- Opération entièrement automatique
- Ensemble de commandes électroniques contrôlées par clavier à touches sensibles
- Capacité de coupe allant jusqu'à 50 mm de diamètre
- Vitesse de coupe variable allant de 200 à 5000 tours minute par incrémentation de 100 tours minute
- Charge de 100 à 1000 grammes par incrémentation de 100 grammes
- Avance automatique de l'échantillon au contact de la lame avec un dispositif de contrôle de faible charge au démarrage de la coupe
- Dispositif incorporé automatique pour le dressage de la lame assurant ainsi le nettoyage et l'aviage de celle-ci
- Tarage automatique de l'échantillon pour une reproductibilité des conditions de coupe
- Butée micrométrique motorisée avec affichage digital sur écran des cotes de positionnement du plan de coupe
- Sécurité : la machine ne peut fonctionner qu'avec le couvercle fermé, l'avance de la butée micrométrique n'étant pas opérationnelle pendant la coupe
- Carrosserie résistante à la corrosion et aux chocs; capot de protection transparent
- Bac de liquide de refroidissement amovible pour un nettoyage aisé
- Alimentation AC universelle de 85 à 264 Volts monophasé 50/60 HZ
- Mémoire permanente des paramètres de la dernière coupe

BUEHLER® ISOMET™ 2000

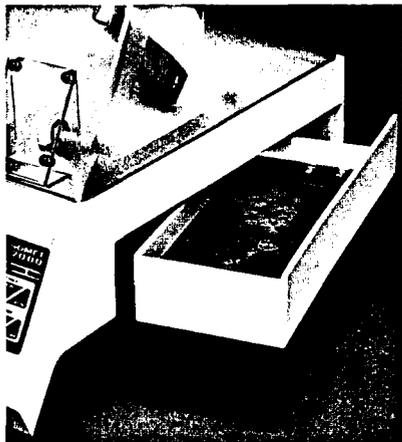
La tronçonneuse de précision ISOMET™ 2000 est commandée par un clavier à touches sensibles et à affichage digitalisé LED des paramètres de coupe (charge, vitesse de rotation et déplacement).

La courbe de la butée micrométrique est de 25,4 mm (1") et la précision de mesure est de 0,1 mm.

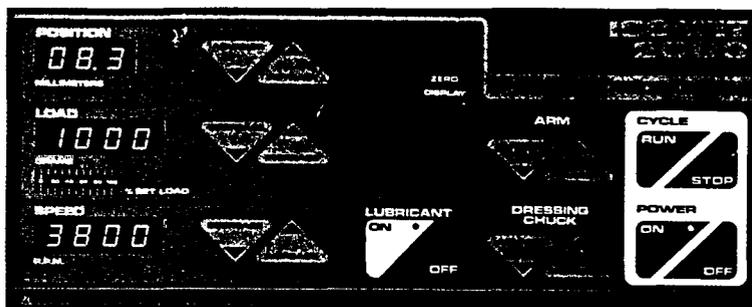
L'ISOMET™ 2000 est équipée d'un bras support d'échantillon couplé à un détecteur électronique contrôlant la force d'application exercée sur la lame. Lorsque le cycle de tronçonnage est lancé, l'échantillon est emmené au contact du disque en rotation et une précharge est appliquée pendant quelques secondes de façon à miniser tout endommagement au niveau de l'échantillon et éviter le flambement de la lame. La charge affichée est par la suite appliquée puis asservie. En fin de coupe, le bras support d'échantillons se relève automatiquement.

En cours de tronçonnage, la lubrification se fait par un dispositif de recirculation. Le bac contenant le lubrifiant est facilement accessible pour faciliter son nettoyage et la récupération de résidus de coupe. La tronçonneuse peut être également connectée directement à un réseau d'eau extérieure ou à un bac de capacité plus importante. Une vaste série de blocs de serrage permettent le positionnement ou l'orientation de n'importe quel échantillon.

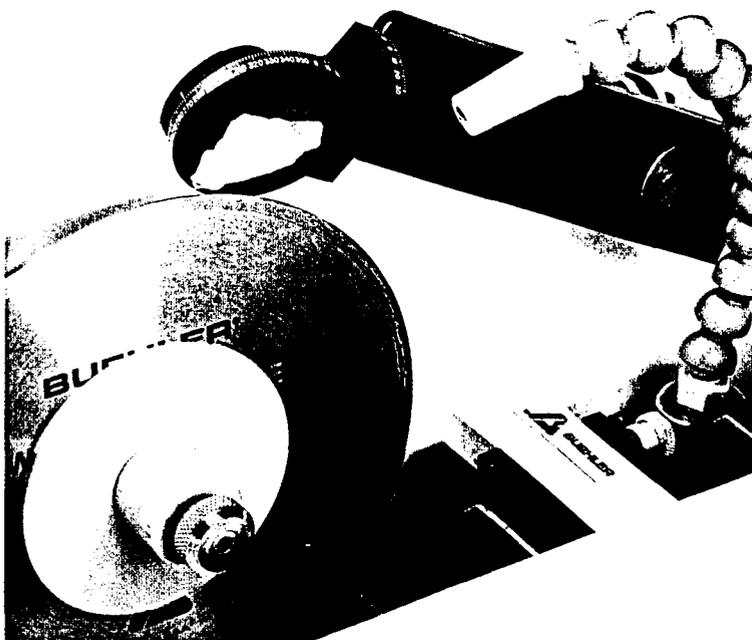
Les performances de tronçonnage sont améliorées par l'utilisation de nos disques diamantés disponibles en diamètres 102 mm, 127 mm, 152 mm et 178 mm en disque résinoïde de 178 mm.



Bac de recirculation amovible permettant le nettoyage et l'évacuation des déchets.



Panneau de contrôle à touches sensibles avec affichage digital des paramètres de tronçonnage.



Goniomètre permettant le positionnement de l'échantillon pour une coupe parallèle à un plan déterminé.

Spécifications

11-2480-250 Tronçonneuse de précision ISOMET™ 2000 avec moteur 0,4 cv (300 W) à courant continu, vitesse continuellement variable de 200 à 5000 tours/mn – capacité de coupe 2" (50 mm) – charge 100 à 1000 grammes – chambre de coupe en plastique moulé (RIM) avec capot de protection transparent – panneau de contrôle à microprocesseur, à touches sensibles et à affichage digital pour la sélection de la vitesse, de la charge et du réglage de la butée micrométrique – contrôle de l'avance et du retrait du bras de support (échantillon) – dressage automatique de la lame – interrupteurs lumineux pour bac de recirculation, marche/arrêt, mise sous tension et témoin de charge (graphique à barre) – micromètre digital motorisé pour déplacement latéral (1" – 25,4 mm) du bras – contrôle électronique de la charge pour application d'une charge légère initiale et contrôle durant le tronçonnage – retrait automatique du bras en fin de coupe – bac de recirculation (2,8l.) amovible avec pompe submersible.

Disque diamanté 11-4276; Paire de flasques 11-2283; Blocs de serrage 11-1186, 11-2487, 11-2491; Lubrifiant de coupe ISOCUT® FLUID-PLUS; Manuel d'instructions; Garantie 2 ans pièces et main-d'œuvre; Alimentation AC 85–264 V, 50/60 Hz monophasé.

Dimensions:	Largeur	55,9 cm
	Profondeur	63,5 cm
	Hauteur	40,6 cm

Poids brut: 40,9 kg

Accessoires :

11 1191 Paire de flasques, diamètre 44 mm, pour coupe profonde sur grands échantillons.

11 2282 Paire de flasques, diamètre 76 mm, pour coupe très profonde avec disques de tronçonnage grand diamètre

11 2283 Paire de flasques, diamètre 102 mm, pour utilisation avec disques de tronçonnage grand diamètre, à vitesse élevée. Assure la rigidité du disque.

11 2284 Paire de flasques, diamètre 127 mm, pour utilisation avec disques de tronçonnage grand diamètre, à vitesse très élevée. Assure la rigidité du disque.

11 2481 Goniomètre pour alignement précis des échantillons selon des angles ou des planétés définies.

11 2487 Bloc de serrage simple pour barreau et tube jusqu'à 1 1/4" (32 mm) de diamètre.

11 2483 Double bloc de serrage 1 1/8" (35 mm) évite d'endommager l'échantillon, par un maintien en position jusqu'à la fin de la coupe.

11 1189 Bloc de serrage pour diamètres 25 mm et 30 mm (1" et 1 1/4") pour échantillons enrobés.

11 2489 Bloc de serrage pour diamètre 1 1/2" (38 mm) et 40 mm pour échantillons enrobés.

11 2485 Bloc de serrage pour échantillons irréguliers.

11 2482 Bloc de serrage pour coupe longitudinale de tubes ou échantillons de forme cylindrique de 1 1/8" à 2 1/8" (29 mm à 54 mm) de longueur.

11 2484 Bloc de serrage de lames de verre pour support de lames minces de 27 x 46 mm.

11 2488 Bloc de serrage de lames de verre pour support de lames minces de 2" x 3" (51 mm x 76 mm).

11 2486 Bloc de serrage wafer pour cristal, lames minces et wafers.

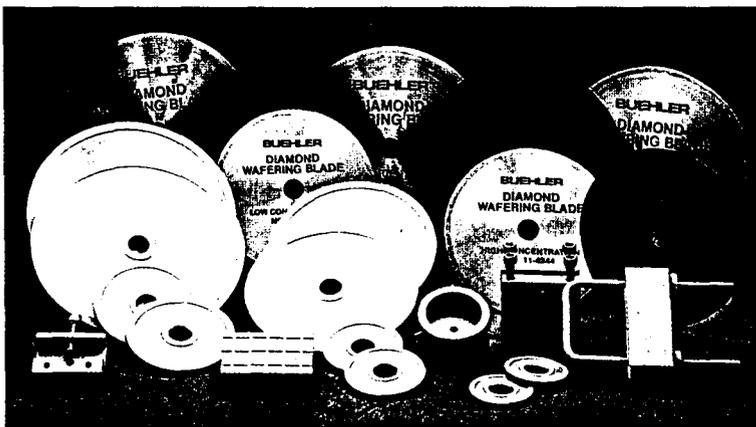
11 2494 Bloc de serrage d'os pour grands échantillons irréguliers tels que les os ou les implants.

11 2491 Bloc de serrage à montage en queue d'aronde à démontage aisé, pour échantillons rigides jusqu'à 1 1/4" (32 mm) de diamètre.

11 2492 Bloc de serrage à montage en queue d'aronde à démontage aisé, pour échantillons rigides jusqu'à 1 1/2" (40 mm) de diamètre.

11 2496 Bloc de serrage protégé pour maintien des échantillons fragiles et friables, par bandes auto-collantes de 1" x 6" résistantes au lubrifiant de coupe.

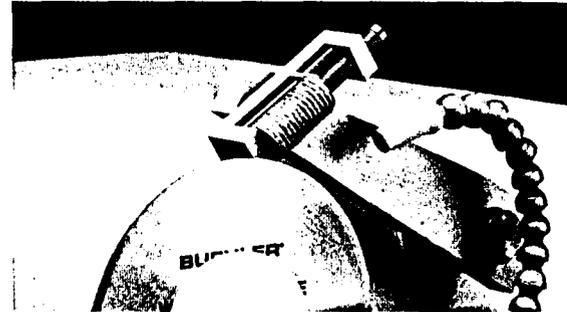
11 2493 Ensemble de recirculation extérieur pour connexion de l'ISOMET™ 2000 à un bac de recirculation extérieur ou directement sur l'alimentation d'eau.



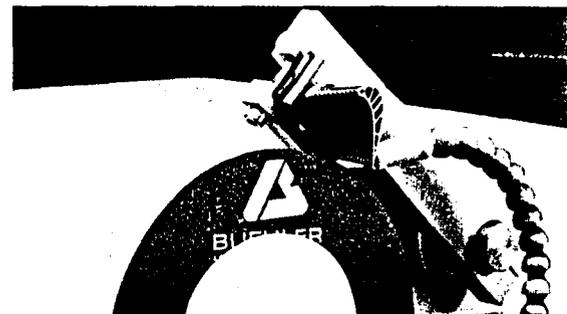
Les nombreux choix offerts (disques de tronçonnage, blocs de serrage, flasques) rendent ainsi l'ISOMET™ 2000 la plus polyvalente des tronçonneuses de laboratoire.



Bloc de serrage pour échantillon enrobé.



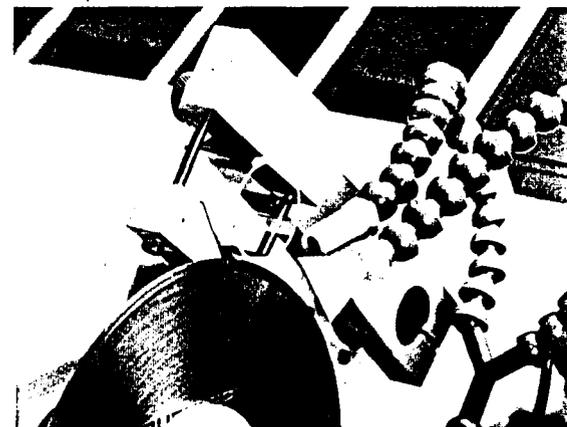
Bloc de serrage pour coupe longitudinale.



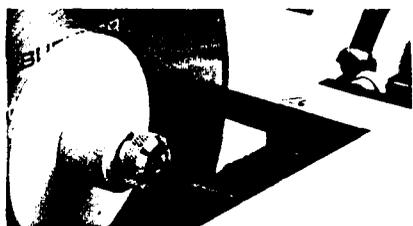
Bloc de serrage simple et disque de tronçonnage.



Bloc de serrage à montage en queue d'aronde pour échantillon céramique rond.



Echantillon de verre fin maintenu par un bloc de serrage avec protection adhésive protectrice.



Barreau de dressage monté à l'extérieur et contrôlé par bloc.

Consommables fournis

N° 11-2293-016 **Lubrifiant ISOCUT® PLUS** 1 demi litre de liquide de lubrifiant de coupe concentré pour l'utilisation de la tronçonneuse de précision ISOMET™ 2000.

N° 11-2490 **Barreau de dressage** (25 × 13 × 75 mm) pour ISO-MET™ 2000 pour disque de tronçonnage diamanté séries 15 et 20.

N° 11-2494 **Barreau de dressage** (25 × 13 × 75 mm) pour ISOMET™ 2000 pour disque de tronçonnage diamanté séries 10 et 5.

Disques de tronçonnage 12,7 mm diamètre d'arbre

Disques de tronçonnage	Diamètre	10,2 cm	12,7 cm	15,2 cm	17,8 cm
	Epaisseur	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm
Série 20HC diamant pour tronçonnage de matériaux et alliages non ferreux durs			11-4215		11-4237
Série 15HC diamant pour tronçonnage général	11-4244	11-4245	11-4246	11-4247	
Série 20LC diamant pour matériaux très durs, céramique, carbure de bore, nitrure de bore, nitrure de silicium			11-4225		11-4227
Série 15LC diamant pour matériaux très durs et cassants; céramique, pièces électroniques, aluminium, zirconium, carbone de silicium	11-4254	11-4255	11-4276	11-4277	
Série 10LC diamant pour céramique tendre, assemblage électronique, matériaux composites			11-4285		11-4287
Série 5LC diamant pour utilisation sur des céramiques tendres, composite à matière fine (fibre de carbone)			11-4295		

Disques de tronçonnage ISOCUT®

Faible concentration pour utilisation pour alliage base: fer et cobalt, nickel et plomb	11-4264	11-4265	11-4266	11-4267
---	---------	---------	---------	---------

Disques de tronçonnage resinoïde 0,8 mm épaisseur, 10 par paquet

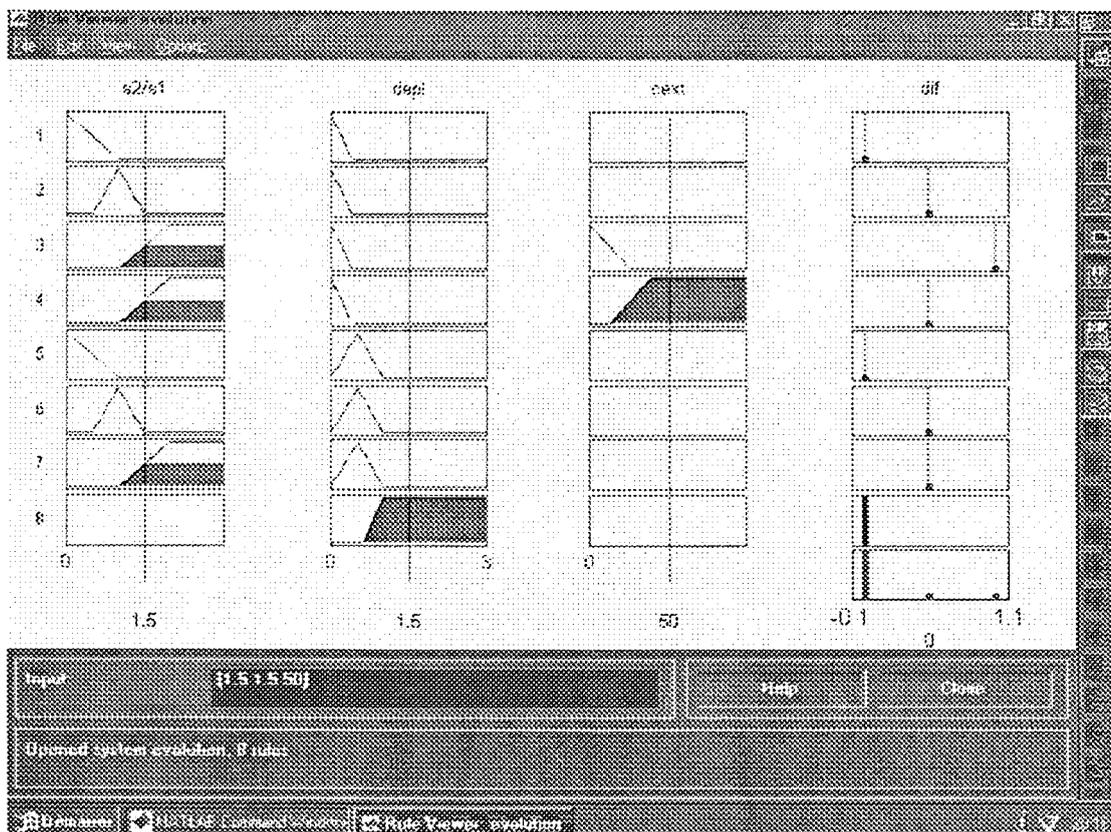
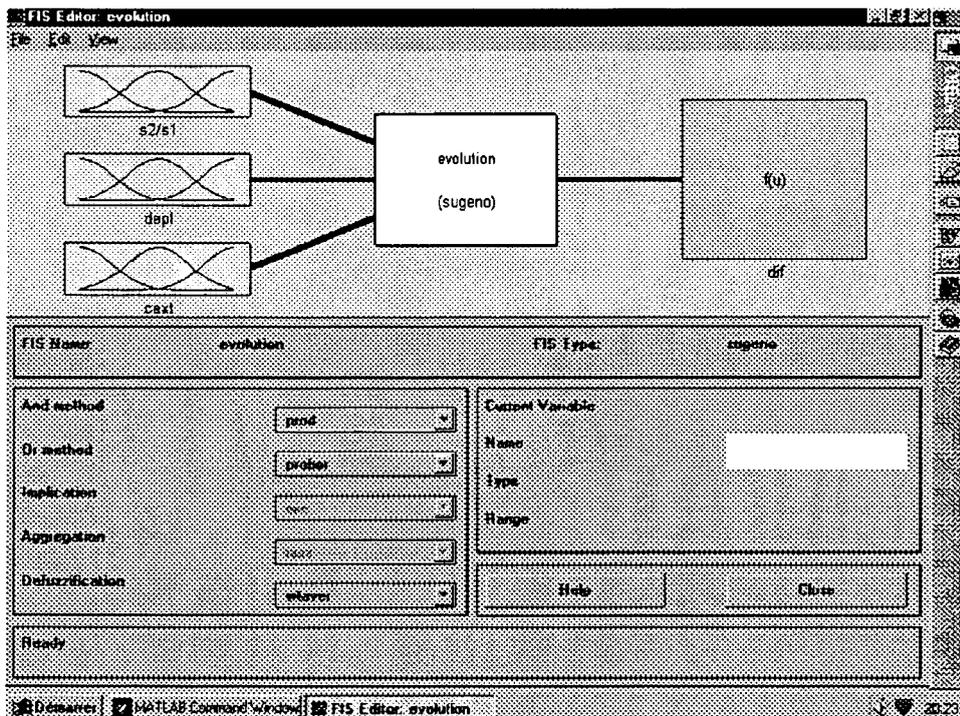
Pour coupes délicates de matériaux ferreux	11-4207-010
Pour coupes délicates des matériaux non ferreux dans titane, uranium, zirconium	11-4217-010



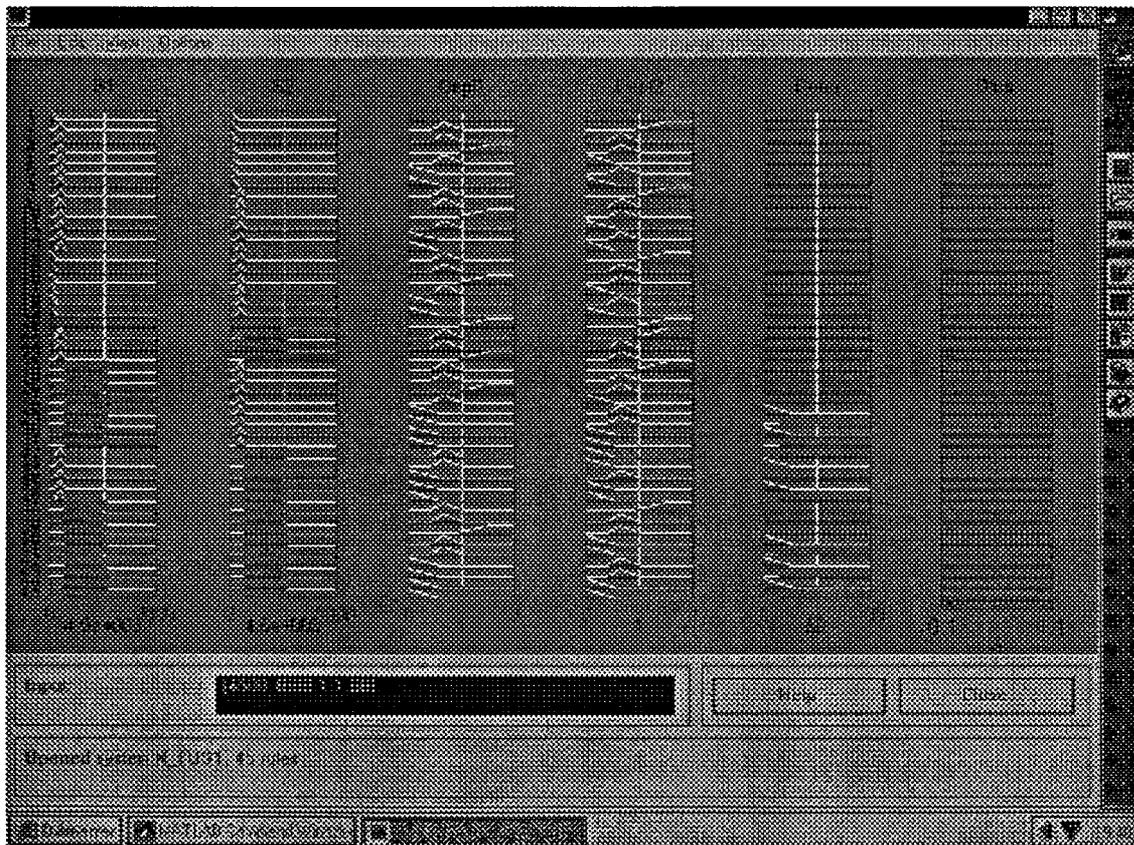
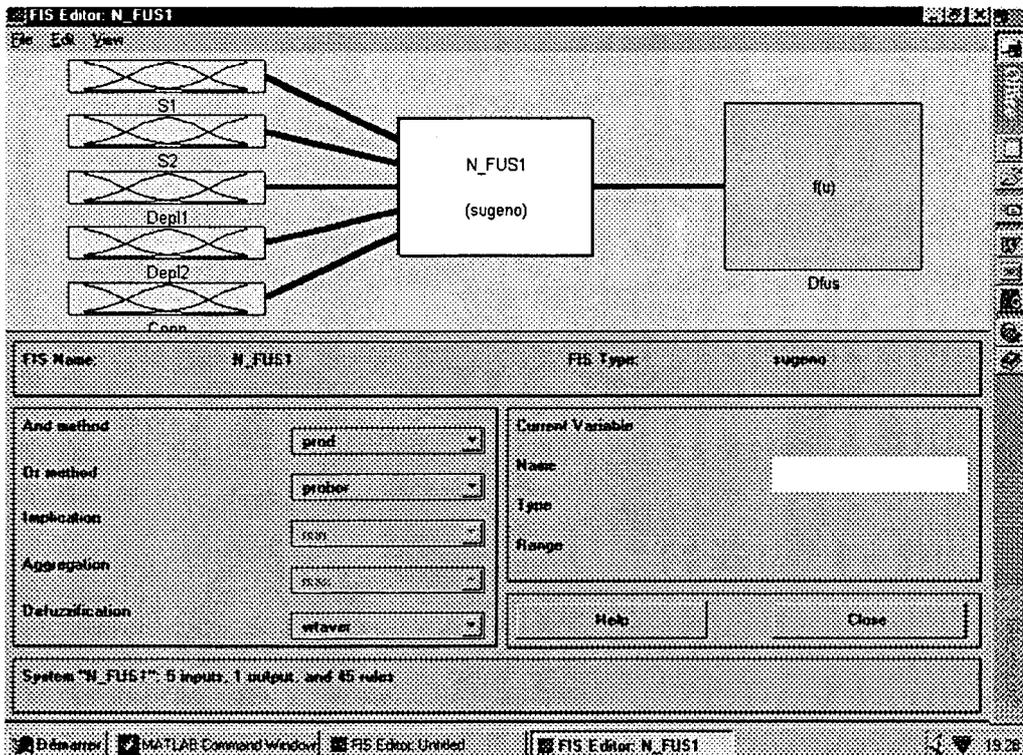
KRAUTKRAMER FRANCE SA

Téléphone 72 17 92 50 · Télécopie 3 05 73 4 F · Télécopie 78 47 56 98
 BP 66 · Z.I. du Tronchon · 7, rue des Rosieristes
 69543 CHAMPAGNE-AU-MONT-D'OR Cedex

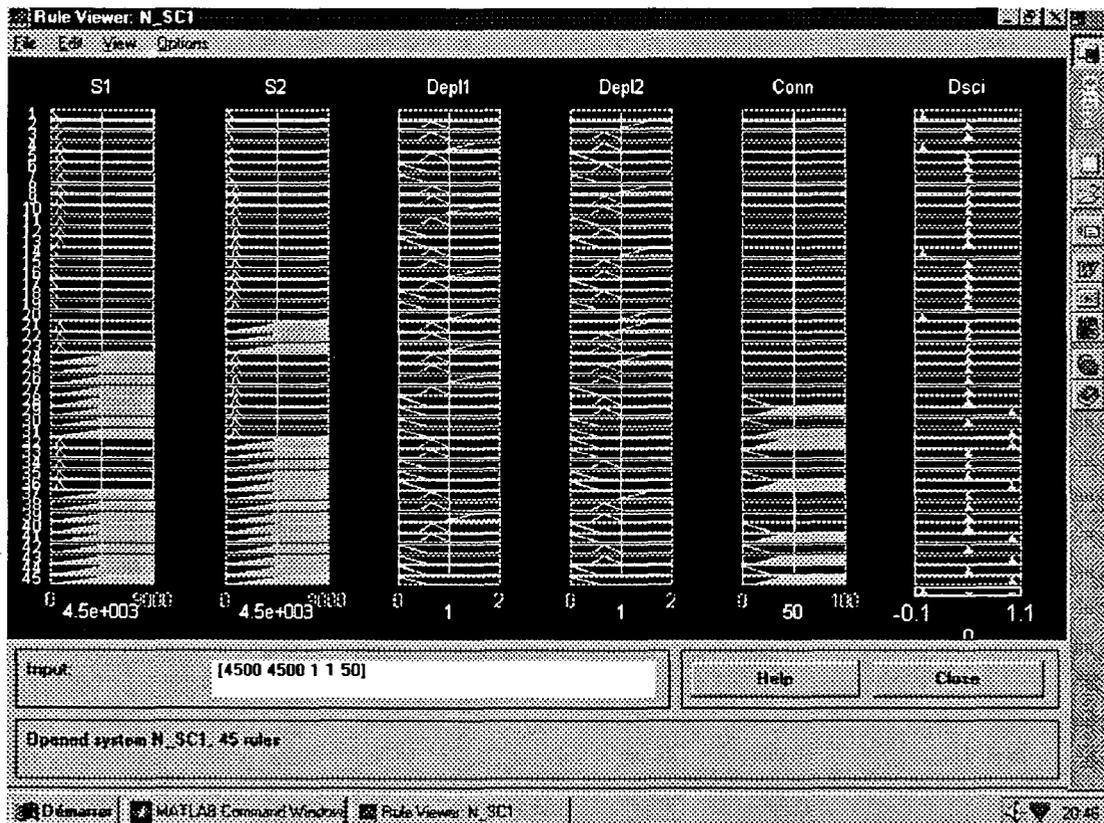
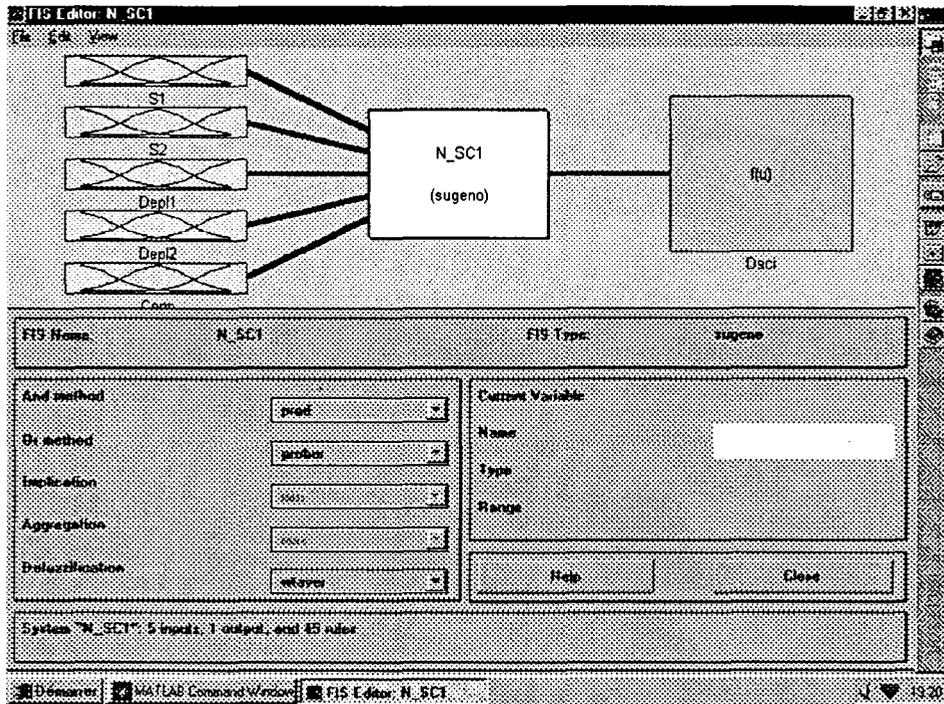
CONTROLEUR DE LOGIQUE FLOUE RELATIF A LA REPRODUCTION



CONTROLEUR DE LOGIQUE FLOUE RELATIF A LA FUSION



CONTROLEUR DE LOGIQUE FLOUE RELATIF A LA SCISSION



RESULTATS OBTENUS A PARTIR DE LA LOGIQUE FLOUE

PASSAGE DE LA COUPE 1 A LA COUPE 2

REPRODUCTION

<u>C1 --> C2</u>	S(1)	S(2)	S2/S1	Depl	Larg_max	2*Depl/Lar_max	Cext	Dreprod
S0 --> S0	2629	3328	1.26	12	82	0.292682927	45.96	0.5
S1 --> S1	1244	1074	0.86	9.2	60	0.306666667	50.48	0.41
S4 --> S3	1098	1126	1.02	3	51	0.117647059	0	0.5
S5 --> S7	549	413	0.75	8	36	0.444444444	0	0.33
S6 --> S8	1431	1069	0.74	3	91	0.065934066	70.57	0.32
S7 --> S4	1734	2655	1.53	18.4	62	0.593548387	57	0.5
S9 --> S9	1836	968	0.52	7.8	71	0.21971831	36.3	0.03
S10 --> S10	1669	2035	1.21	7.6	69	0.220289855	0	0.56
S14 --> S13	612	480	0.78	11.3	28	0.807142857	41	0.13
S15 --> S11	631	1700	2.69	7.8	37	0.421621622	0	0.5
S13 --> S14	874	1250	1.43	4.24	43	0.197209302	0	0.71

FUSION

<u>C1 --> C2</u>	Depl1	Depl2	Cint	Dfusion
S3 + S2 --> S2	0.53	0.32	0	0.5
S12 + S11 --> S12	0.3	0.66	0	0.5

SCISSION

<u>C1 --> C2</u>	Depl1	Depl2	Cint	Dscission
S8 --> S5+S6	0.75	0.39	0	0.5

PASSAGE DE LA COUPE 2 A LA COUPE 3

REPRODUCTION

<u>C2 --> C3</u>	S(1)	S(2)	S2/S1	Depl	Larg_max	2*Depl/Lar_max	Cext	Dreprod
S0 --> S0	3328	3929	1.18	0	104	0	66.6	0.5
S1 --> S1	1074	1360	1.26	8.2	62	0.26	53	0.5
S2 --> S2	1581	1749	1.1	5.1	69	0.14	0	0.53
S3 --> S3	1126	690	0.61	10.3	54	0.38	0	0.18
S4 --> S4	2655	2008	0.75	13.4	63	0.42	62.8	0.33
S6 --> S6	1042	604	0.58	3.1	51	0.12	25.8	0.12
S9 --> S8	968	1152	1.19	5.8	43	0.27	18.97	0.51
S10-->S9	2035	1351	0.66	2.8	80	0.07	20.8	0.24
S11-->S10	1700	1938	1.14	5.8	70	0.16	0	0.55
S13-->S12	480	512	1.06	7.2	32	0.45	25.45	0.5

FUSION

<u>C2 --> C3</u>	Depl1	Depl2	Cint	Dfusion
S8 + S7 --> S7	0.26	0.25	22.13	0.9
S12+S14 --> S11	0.27	0.69	0	0.5

APPARITION

<u>C2 --> C3</u>	Dappa
S5	0.5

DISPARITION

<u>C2 --> C3</u>	Ddisp
S5	0.5

PASSAGE DE LA COUPE 3 A LA COUPE 4

REPRODUCTION

<u>C3 --> C4</u>	<u>S(1)</u>	<u>S(2)</u>	<u>S2/S1</u>	<u>Depl</u>	<u>Larg_max</u>	<u>2*Depl/Lar_max</u>	<u>Cext</u>	<u>Dreprod</u>
S0 --> S0	3929	4280	1.09	12.2	92	0.26	74.2	0.5
S1 --> S1	1360	1536	1.12	3.16	61	0.1	54	0.5
S4 --> S4	2008	2054	1.02	6.7	66	0.2	49.25	0.5
S5 --> S5	684	955	1.39	10.4	34	0.61	0	0.47
S6 --> S6	604	550	0.91	12.1	37	0.65	19.8	0.37
S8 --> S8	1152	832	0.72	5.3	53	0.2	24.35	0.3
S9 --> S9	1351	1639	1.21	3	58	0.1	22	0.51
S11 --> S13	2343	1622	0.69	10.4	74	0.28	52.7	0.27
S12 --> S10	512	784	1.53	6	36	0.33	0	0.60
S10 --> S3	1938	1325	0.68	13.89	72	0.38	0	0.26

FUSION

C3 --> C4

	<u>Depl1</u>	<u>Depl2</u>	<u>Cint</u>	<u>Dfusion</u>
S3+S2 --> S2	0.49	0.48	20.24	0.85

SCISSION

C3 --> C4

	<u>Depl1</u>	<u>Depl2</u>	<u>Cint</u>	<u>Dscission</u>
S7-->S12+S7	0.3	0.41	0	0.5

APPARITION

C3 --> C4

	<u>Dappa</u>
S11	0.5

PASSAGE DE LA COUPE 4 A LA COUPE 5

REPRODUCTION

<u>C4 → C5</u>	<u>S(1)</u>	<u>S(2)</u>	<u>S2/S1</u>	<u>Depl</u>	<u>Larg_max</u>	<u>2*Depl/Lar_max</u>	<u>Cext</u>	<u>Dreprod</u>
S0 → S0	4280	4071	0.95	11.3	89	0.25	67	0.47
S2 → S2	1477	1095	0.74	5.1	63	0.16	0	0.32
S3 → S3	1325	1228	0.92	11.2	55	0.4	0	0.45
S4 → S4	2054	2092	1.02	6.3	60	0.21	0	0.5
S7 → S10	640	596	0.93	14.4	38	0.76	0	0.25
S9 → S7	1639	1551	0.94	26.3	70	0.75	25.17	0.26
S10 → S11	784	747	0.95	17	50	0.68	0	0.35
S11 → S9	814	333	0.4	12.8	43	0.59	0	0
S12 → S6	1827	1539	0.84	15.13	79	0.38	60	0.4
S13 → S8	1622	1846	1.14	6.4	62	0.2	44.65	0.5
S5 → S5	955	1038	1.08	11.66	66	0.35	36.4	0.5

FUSION

C4 → C5

	<u>Depl1</u>	<u>Depl2</u>	<u>Cint</u>	<u>Dfusion</u>
S8+S1 → S1	0.62	0.5	10	0.5

DISPARITION

C4 → C5

S6

<u>Ddisp</u>
0.5

PASSAGE DE LA COUPE 5 A LA COUPE 6

REPRODUCTION

<u>C5 --> C6</u>	S(1)	S(2)	S2/S1	Depl	Larg_max	2*Depl/Lar_max	Cext	Dreprod
S5 --> S4	1038	1086	1.04	7.2	47	0.3	0	0.506
S6 --> S2	1539	1918	1.24	15.6	55	0.56	0	0.50
S8 --> S7	1846	1739	0.94	14.14	66	0.43	47	0.46
S1 --> S1	1424	1479	1.04	3.61	76	0.09	50	0.50
S4 --> S3	2092	2015	0.96	5	70	0.14	46	0.47
S7 --> S6	1551	1544	0.99	5.83	71	0.16	63	0.49
S0 --> S0	4071	7564	1.85	32.31	101	0.64	61	0.43

DISPARITION

<u>C5 --> C6</u>	Ddisp
S2	0.5
S3	0.5
S9	0.5
S10	0.5
S11	0.5

APPARITION

<u>C5 --> C6</u>	Dappa
S5	0.5
S8	0.5
S9	0.5

PASSAGE DE LA COUPE 6 A LA COUPE 7

REPRODUCTION

<u>C6 --> C7</u>	<u>S(1)</u>	<u>S(2)</u>	<u>S2/S1</u>	<u>Depl</u>	<u>Larg_max</u>	<u>2*Depl/Lar_max</u>	<u>Cext</u>	<u>Dreprod</u>
S1 --> S1	1479	797	0.54	3	80	0.07	50	0.05
S3 --> S8	2015	1906	0.94	5.83	75	0.15	46	0.46
S2 --> S7	1918	1374	0.72	2.24	69	0.06	36	0.30
S7 --> S11	1739	1741	1	8	78	0.2	44	0.50
S8 --> S13	1248	724	0.58	7.07	52	0.27	0	0.13

SCISSION

<u>C6 --> C7</u>	<u>Depl1</u>	<u>Depl2</u>	<u>Cint</u>	<u>Dscission</u>
S0-->S4+S0	0.38	0.48	23.85	0.95
S9-->S2+S3	0.75	0.44	0	0.5
S4-->S9+S5	0.48	0.49	0	0.5
S5-->S10+S15	0.68	0.4	0	0.5

APPARITION

<u>C6 --> C7</u>	<u>Dappa</u>
S6	0.5
S12	0.5
S14	0.5

DISPARITION

<u>C6 --> C7</u>	<u>Ddisp</u>
S6	0.5



PASSAGE DE LA COUPE 7 A LA COUPE 8

REPRODUCTION

<u>C7 --> C8</u>	<u>S(1)</u>	<u>S(2)</u>	<u>S2/S1</u>	<u>Depl</u>	<u>Larg_max</u>	<u>2*Depl/Lar_max</u>	<u>Cext</u>	<u>Dreprod</u>
S0 --> S0	3599	4146	1.15	14.3	94	0.3	58.24	0.50
S3 --> S3	885	1213	1.37	5.83	47	0.25	0	0.63
S6 --> S6	988	723	0.73	5.65	50	0.22	0	0.31
S7 --> S10	1374	1393	1.02	13.34	52	0.51	35	0.50
S8 --> S9	1906	1630	0.85	3.16	66	0.09	39.56	0.41
S9 --> S8	1148	648	0.56	5.83	50	0.23	30	0.10
S11 --> S12	1741	1064	0.61	15.03	77	0.39	42	0.18
S12 --> S13	739	640	0.86	8	42	0.38	0	0.41

DISPARITION

C7 --> C8

Ddisp

S1	0.5
S2	0.5
S5	0.5
S13	0.5
S14	0.5

APPARITION

C7 --> C8

Dappa

S1	0.5
S7	0.5
S11	0.5
S14	0.5
S15	0.5

FUSION

C7 --> C8

Depl1

Depl2

Cint

Ddiffusion

S15+S10-->S2	0.47	0.9	0	0.37
--------------	------	-----	---	------

SCISSION

C7 --> C8

Depl1

Depl2

Cint

Dscission

S4 --> S4+S5	0.26	0.5	15	0.63
--------------	------	-----	----	------

SIMULATION DE LA DIFFUSION A DIFFERENTS INSTANTS

