



**HAL**  
open science

# Contribution à l'étude de structures tissées déformables : application à l'évaluation du tenseur perméabilité des feutres de presses de papeterie

Xavier Thibault

## ► To cite this version:

Xavier Thibault. Contribution à l'étude de structures tissées déformables : application à l'évaluation du tenseur perméabilité des feutres de presses de papeterie. Génie des procédés. Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001. Français. NNT : 2001INPG0145 . tel-04004671

**HAL Id: tel-04004671**

**<https://theses.hal.science/tel-04004671>**

Submitted on 25 Feb 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N°

**THÈSE**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'INPG**

Spécialité : Génie des Procédés, option procédés papetiers.

Préparée au laboratoire de Génie des Procédés Papetiers  
dans le cadre de l'école doctorale « Matériaux et Génie des Procédés »  
présentée et soutenue publiquement par

**Xavier Thibault**

Le 12 décembre 2001.

---

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE  
STRUCTURES TISSÉES DÉFORMABLES :  
APPLICATION À L'ÉVALUATION DU  
TENSEUR PERMÉABILITÉ DES FEUTRES DE  
PRESSES DE PAPETERIE**

---

Sous la direction de

**Jean-Francis BLOCH**

et de

**Jean-Louis AURIAULT**

Jury :

M. Dominique LACHENAL	, Président
M. Pierre ADLER	, Rapporteur
M. Dominique ADOLPHE	, Rapporteur
M. Jean-Louis AURIAULT	, Directeur de thèse
M. Jean-Francis BLOCH	, Directeur de thèse
M. Jean-Marie SERRA-TOSIO	, Membre invité.



À Léone et Philéas Herbelin-Thibault, mes arrières grands parents,  
à Georgette et Jean Thibault-Herbelin, mes grands parents,  
à Claudine et Michel Thibault-Désanglois, mes parents,  
à Carine Clot-Thibault, mon épouse,  
à toute ma famille...



# REMERCIEMENTS

*La reconnaissance silencieuse ne sert à personne.*

Gladys Bronwyn Stern (Ecrivain américain fin XIX<sup>ième</sup>).

J'ai mené ce travail de recherche à l'École Française de Papeterie et des Industries Graphiques, au sein de l'équipe de Physique de Papier du Laboratoire de Génie de Procédés Papetiers. Cette thèse de doctorat entre dans le cadre du projet européen Joule III. Ce contexte m'a conduit à effectuer plusieurs séjours à l'étranger. Par conséquent, cette thèse doit beaucoup à bon nombre de personnes qui m'ont offert leur hospitalité, leur conseil, leur aide et leur soutien, parfois tout cela en même temps. Mes remerciements les plus sincères s'adressent à tous ceux qui, de près ou de loin, directement ou indirectement, par leur compétence, leur aide ou leur amitié, ont contribué à mener cette étude à bien.

Je voudrais tout d'abord remercier Jean-Francis Bloch pour m'avoir accordé sa confiance, son soutien et son amitié dans le contexte de ce travail. Je remercie de même Jean-Louis Auriault pour avoir accepté de diriger cette thèse. Ces deux personnes n'ont eu de cesse de m'encourager et m'ont apporté leur compétence ainsi que leur rigueur scientifique.

Je suis profondément reconnaissant aux personnes qui m'ont fait l'honneur de s'intéresser à mon travail : Pierre Adler et Dominique Adolphe, rapporteurs de mon mémoire, Dominique Lachenal qui a accepté la présidence du jury de thèse. J'ai en particulier apprécié leurs suggestions et leur encouragements.

Les renseignements et les conseils de Jean-Marie Serra-Tosio, Pierre Chevallier, Jean-Gabriel Samuel, Lennart Olsson, Vikram Kaul, Jean-Claude Roux et Reverdy Nadège, se sont avérés très précieux et m'ont permis de valoriser la partie bibliographique ainsi que certains résultats.

La participation de José Baruchel, d'Élodie Boller, de Peter Cloetens ainsi que tous les membres de la ligne de lumière ID19 de l'ESRF a été déterminante dans mes travaux ainsi que dans ma vie professionnelle. Ces acteurs m'ont permis d'élargir le champ de mes expériences et ont enrichi ce travail par une approche originale de l'analyse structurale.

J'aimerais remercier chaleureusement, un ami et collègue, Yves Chaves pour son aide précieuse, ses conseils avisés et sa disponibilité permanente à mon égard. Son enthousiasme et son ingéniosité sont particulièrement motivants.

Benjamin Loret m'a permis d'effectuer une activité d'enseignement à l'École Nationale de Mécanique et d'Hydraulique de Grenoble. Je suis très reconnaissant envers lui pour m'avoir permis de connaître cette expérience.

Plusieurs chercheurs ont accompagné cette étude et m'ont enrichi de leur connaissance, de leur vision extérieure à mes travaux et de leur amitié. Je sais donc gré à Gilles Armand, Olivier Gay, Laurent Godard, Nicolas Gatelier, Ginesa Losilla, Jack Lanier, Denis Caillerie, Danièle Cardona-Barrau, Jean-Pierre Gervasoni, Christophe Mercier.

Merci à Ridha Kedadi pour m'avoir accordé sa confiance pour l'utilisation du porosimètre à mercure. Merci aussi à Laurence Schacher pour le temps passé avec moi à m'expliquer le fonctionnement des appareils de mesure dont est dotée l'Ecole Nationale des Industries Textiles de Mulhouse. De même je remercie Pierre Bonnet de son aide précieuse lors de mon passage au sein de l'unité de production de feutres 'Binet' à Annonay.

Je remercie chaleureusement Christian Voillot pour avoir mis en place un statut officiel pour les doctorants permettant ainsi de valoriser pleinement ces trois années de recherches.

Un grand merci à tous ceux qui ont participé à l'aspect technique de ma thèse et qui m'ont accompagné le midi au restaurant universitaire : Jean-Luc Tourron, Philippe et Nathalie Lorent, Chu et Charlotte Ly-Biami, Philippe Serpollet, Stéphane Dufreney, Xavier Quenoi, Jean-Marc Lamouroux et Olivier Ruchier.

Je remercie tous ceux avec qui j'ai échangé des idées constructives ou un point de vue : Carole Ayala, Florence Peillex, Carole Benevise, Nicolas et Helene Benattar, Michael Allix, Vanessa Durrieux, Evelyne Mauret, Martine Rueff, Jean-Claude Rosselet, Pierre 'Bobosse' Mondjian, Ludivine Onic, Michel Favergeon, Olga Cochenet, Guy Caucau, Gilles Tarrajat, Géraldine Champon, Pierre et Laurence Leroy, Sahar Hariri, Jean-Pierre Andréolety, Christine N'Guyen, Nathalie Marlin, Elsa Tournaedre, Gheneim Rana, Perez Berumen Catalina, Eliane Rousset, Denis Curtil, Anne Pandolfi, Bernard Pineaux, Dina Nyangiro, Martine Bouchon, Christelle Mateo, Nicolas Leroy, Antonin D'Aveni, Gérard Mortha, Isabelle Desloges, Edmond Richard, Maurice Renaud, Franck Medlege, Raphaël Passas, Lionel Chagas, Didier Chaussy, Berthine Khelefi et tous les gens sympathiques dont j'ai omis le nom...

Merci aux concepteurs - développeurs informatiques qui ont créé : Matlab, le fortran, ImageJ, VGS studio, linux, OS, adobe illustrator, acrobat reader, le pear to pear.

Je remercie les sociétés et organisations suivantes sans qui cette aventure n'aurait pas toujours été possible : l'AGEFPI, ALU-SUISSE, ALBANY, les ASSEDIC, ATP, BASF, CATERPILLAR, CGE Saint Martin d'Hères, le DEA CGM, la DGGN, l'Ecole doctorale MGP, EDF-GDF, GO SPORT, JOUD-Aquazur-Ondéo-Nalco-Suez, JOUVE, le ministère de l'enseignement et de la recherche, le ministère du travail, PAYEN, PEUGEOT, PHILIPS, les papeteries de Cran, STFI, le STRM, ST microélectronique, SJP, STC, SENSOREX, la TAG, VOITH.

# SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	11
CHAPITRE I : LE PRESSAGE.....	15
<b>I.1 La machine à papier.</b> .....	<b>17</b>
1.1 Circuit de tête.....	18
1.2 Caisse de tête.....	18
1.3 Partie humide : table de formation ou table plate. ....	19
1.4 Section de presses, appelée aussi, section des presses. ....	20
1.5 Séchage.....	20
1.6 Opérations de finition.....	20
<b>I.2 Le pressage.</b> .....	<b>21</b>
2.1 Description du pressage.....	21
2.2 Veille technologique.....	22
2.2.a Presses à écoulement longitudinal ou presses pleines.....	23
2.2.b Presse aspirante.....	24
2.2.c Presse à toile.....	25
2.2.d Presse rainurée.....	25
2.2.e Presse à trous borgnes.....	26
2.2.f Presse à manchon rétrécissant.....	27
2.2.g Presse à pince étendue.....	27
2.2.h Presse à double feutre.....	27
2.2.i Presse à sabot.....	28
2.2.j Pressage à chaud.....	29
2.2.k Pick up.....	29
2.2.l Conclusions et perspectives.....	29
2.3 Veille scientifique.....	30
2.3.a Théorie.....	30
2.3.b Travaux expérimentaux.....	33
2.3.c Travaux numériques.....	35
2.3.d Conclusion.....	37
<b>I.3 Le feutre.</b> .....	<b>38</b>
3.1 Fonctions et propriétés.....	38
3.2 Étapes de la vie d'un feutre.....	39
3.3 Historique et matières premières.....	40
3.4 Construction du feutre.....	41
3.4.a Les différents canevas.....	41
3.4.b La nappe ou voile.....	42
3.4.c L'aiguilletage.....	43
3.4.d Les traitements thermiques ou chimiques.....	44
3.5 Les différents types de feutre.....	44
3.5.a Les feutres aiguilletés à canevas souple (Batt On Base BOB).....	44
3.5.b Les feutres non tissés sans canevas (Non Woven Baseless).....	44
3.5.c Les feutres aiguilletés à canevas rigide (Batt On Mesh : BOM).....	45
3.5.d Les feutres aiguilletés sans trame.....	45
3.5.e Les feutres aiguilletés à trame espacée.....	45
3.5.f Les feutres aiguilletés sans croisement (crossless).....	45
3.5.g Les feutres aiguilletés double ou triple canevas (laminated felt).....	45
3.5.h Les nouveaux feutres.....	46
3.5.i Sélection d'un feutre.....	46
<b>I.4 Conclusion.</b> .....	<b>47</b>

<b>CHAPITRE II : CONCEPTION DU PERMÉAMÈTRE. ....</b>	<b>51</b>
<b>II.1 Définition générale de la résistance à l'écoulement. ....</b>	<b>51</b>
1.1 Détermination du régime d'écoulement lors du pressage. ....	52
1.2 Choix de la loi d'écoulement. ....	54
1.3 Synthèse bibliographique sur les études expérimentales de la résistance à l'écoulement. ....	56
1.3.a Techniques utilisant un gaz. ....	56
1.3.b Techniques radiale et unidirectionnelle utilisant de l'eau. ....	57
1.3.c Technique transversale utilisant de l'eau. ....	60
1.3.d Travaux expérimentaux relatifs au feutre. ....	60
1.4 Conclusion. ....	61
<b>II.2 Conception du perméamètre. ....</b>	<b>62</b>
2.1 Cahier des charges. ....	62
2.2 Conception des cellules. ....	62
2.2.a Dimensionnement. ....	64
2.2.b Fabrication. ....	70
<b>II.3 Essai de faisabilité. ....</b>	<b>72</b>
3.1 Qualité de l'eau et formation de bulles. ....	72
3.2 Fonctionnement de l'anneau de garde. ....	75
3.3 Calcul de la résistance à l'écoulement. ....	77
3.3.a Description des données mesurées. Calcul de la viscosité. ....	77
3.3.b Justification de l'utilisation de la loi de Darcy. ....	78
3.3.c Interprétation des mesures. ....	80
3.4 Calcul d'erreur. ....	84
3.4.a Erreur due aux lectures de mesures. ....	84
3.4.b Erreur induite par la transformation des données avant corrélation. ....	85
3.4.c Erreur induite par la corrélation utilisant la méthode des moindres carrés. ....	85
3.4.d Erreur induite par le calcul de la perméabilité. ....	86
<b>II.4 Protocole des mesures de perméabilité. ....</b>	<b>87</b>
4.1 Mesure de la perméabilité transversale. ....	87
4.2 Mesure de la perméabilité longitudinale. ....	88
<b>CHAPITRE III : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES MESURES DE PERMÉABILITÉ. ....</b>	<b>91</b>
<b>III.1 Quelques résultats de compression. ....</b>	<b>93</b>
1.1 Résultats rhéologiques. ....	93
1.2 Comparaison. ....	98
<b>III.2 Influence de la compression sur le tenseur de perméabilités. ....</b>	<b>101</b>
2.1 Mesure perméabilité transversale. ....	101
2.1.a Mesures réalisées sur un perméamètre à air. ....	101
2.1.b Mesures réalisées avec le perméamètre transversal de Chevallier. ....	104
2.1.c Mesures réalisées avec le nouvel appareil. ....	106
2.2 Modélisation de la résistance à l'écoulement. ....	110
2.2.a Choix des modèles. ....	110
2.2.b Application des modèles retenus. ....	113
2.3 Mesures de perméabilité longitudinale. ....	114
<b>III.3 Influence de la tension sur le tenseur de perméabilités. ....</b>	<b>121</b>
3.1 Mesure de la perméabilité transversale. ....	121
3.2 Mesure de la perméabilité longitudinale. ....	124
<b>III.4 Conclusion. ....</b>	<b>126</b>

<b>CHAPITRE IV : ANALYSE STRUCTURALE.</b> .....	<b>129</b>
<b>IV.1 Conductibilité.</b> .....	<b>129</b>
<b>IV.2 Porosimétrie.</b> .....	<b>134</b>
2.1 Introduction. ....	134
2.1.a <i>Préambule.</i> .....	134
2.1.b <i>Principes de fonctionnement du porosimètre.</i> .....	136
2.2 Le porosimètre à mercure. ....	138
2.2.a <i>Le matériel.</i> .....	138
2.2.b <i>Le fonctionnement.</i> .....	139
2.3 Protocole. ....	141
2.4 Résultats des mesures. ....	141
<b>IV.3 Microtomographie.</b> .....	<b>146</b>
3.1 Introduction. ....	146
3.2 La microtomographie aux rayons X. ....	147
3.2.a <i>Préambule.</i> .....	147
3.2.b <i>Génération des rayons X.</i> .....	147
3.2.c <i>Atténuation du rayonnement.</i> .....	149
3.2.d <i>Reconstruction.</i> .....	153
3.2.e <i>Description de l'appareil d'acquisition.</i> .....	154
3.3 Acquisition et reconstruction. ....	155
3.3.a <i>Protocole.</i> .....	155
3.3.b <i>Binarisation.</i> .....	156
3.3.c <i>Visualisation tridimensionnelle.</i> .....	158
3.4 Analyse des données. ....	159
3.4.a <i>Évaluation de la porosité.</i> .....	159
3.4.b <i>Stérométrie.</i> .....	160
<b>IV.4 Conclusion.</b> .....	<b>172</b>
<b>IV.5 Perspectives : Modélisation de la perméabilité et de la conductibilité thermique.</b> .....	<b>173</b>
5.1.a <i>Utilisation de l'auto-corrélation pour déterminer la représentativité du milieu.</i> .....	173
5.1.b <i>Modélisation de la conductibilité thermique des feutres.</i> .....	176
5.1.c <i>Modélisation de la résistance à l'écoulement des feutres.</i> .....	179
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>127</b>
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>183</b>
<b>ANNEXE A : PLAN DU PERMÉAMÈTRE.</b> .....	<b>191</b>
<b>ANNEXE B : : DESCRIPTION DES FEUTRES.</b> .....	<b>197</b>
<b>ANNEXE C : RHÉOLOGIE DES FEUTRES.</b> .....	<b>201</b>
<b>ANNEXE D : RÉSULTATS DES MESURES DE POROSIMÉTRIE AU MERCURE.</b> .....	<b>205</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b> .....	<b>191</b>



# INTRODUCTION

Les soucis économiques et environnementaux de réduction de la consommation d'énergie sont très présents dans l'industrie papetière. Le projet européen JOULE III (JOECT92) s'inscrit dans cette optique. Le but de ce projet est d'améliorer le pressage du papier afin de réduire la consommation d'énergie lors de sa fabrication. Dans ce cadre, cette thèse a pour objectif d'étudier et de caractériser les feutres de section de presses afin d'optimiser l'expression de l'eau lors de l'essorage de la feuille de papier.

Les deux premiers chapitres sont centrés sur la description du pressage de la feuille de papier et la conception de l'appareil expérimental permettant de mesurer la perméabilité transversale et longitudinale du feutre utilisé lors du pressage. Le tenseur des perméabilités des feutres est étudié en fonction de leurs déformations dans le troisième chapitre. Enfin, dans le dernier chapitre, l'analyse structurale de ces feutres est réalisée afin de dégager les paramètres géométriques microscopiques représentatifs du comportement macroscopique.



# CHAPITRE I

## *LE PRESSAGE*



## Chapitre I : LE PRESSAGE.

Aujourd'hui, le papier est non seulement un support de communication incontournable, mais il est aussi utilisé comme emballage et dans l'hygiène quotidienne. Il est également utilisé dans l'électronique pour la fabrication des condensateurs notamment. L'apparition du papier remonte à deux siècles avant notre ère en Chine. À cette époque, il est uniquement constitué de fibres ou d'éléments de fibres qui sont généralement d'origine végétale (chanvre, bambou) (De Biasi P.-M. 1999). De son invention à nos jours, le principe de fabrication du papier n'a pas changé : la pâte à papier est obtenue par la mise en suspension et dispersion de fibres végétales dans de l'eau. Cette pulpe est uniformément répartie sur un ou plusieurs médias filtrants. Puis, après pressage, la feuille obtenue est séchée. Néanmoins le procédé de fabrication moderne, lui, a considérablement changé, passant d'une fabrication manuelle feuille à feuille à une production industrielle.

Le papier commence à se répandre en Europe au XII<sup>ème</sup> siècle en partant de l'Espagne et de la Sicile parallèlement aux conquêtes arabes. Au XV<sup>ème</sup> siècle, avec l'invention de l'imprimerie, les moulins à papier où la pâte est fabriquée, prennent de l'essor. En 1798, Louis Nicolas Robert (1761-1828) met au point la première machine à papier capable de former une feuille continue (Tour M.). Depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, la principale matière fibreuse utilisée pour la fabrication du papier est le bois. Suivant la provenance des fibres, issues d'arbres résineux ou d'arbres feuillus (fig. I-1), les caractéristiques du papier ne sont pas les mêmes.

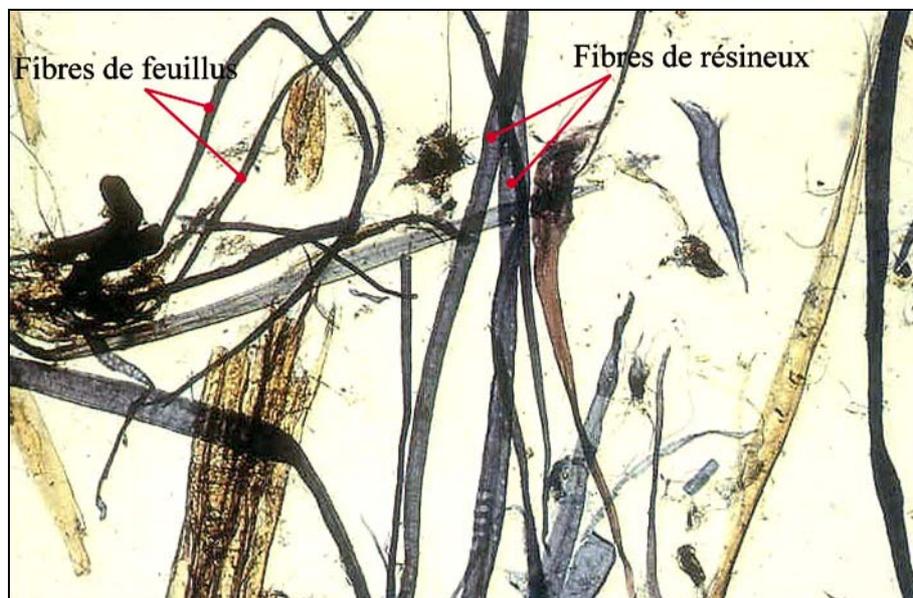
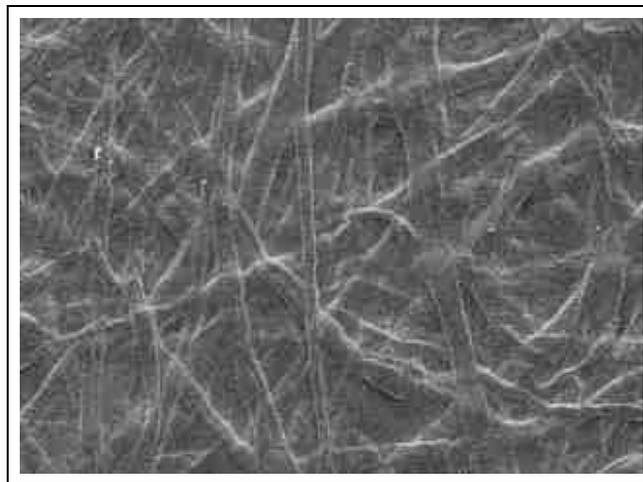


Figure I-1 : Comparaison des fibres de feuillus et de résineux d'après (Aitken Y., Cadel F. & al. 1988).

Le papier se vend au poids. Le grammage, masse par unité de surface, est alors une donnée primordiale de même que la siccité du papier, teneur en matière sèche du matériau. Si le papier peut être considéré macroscopiquement comme bidimensionnel, son épaisseur est une donnée importante à l'échelle des fibres. Néanmoins, cette propriété classique est difficile à mesurer du fait, par exemple, de la rugosité des faces de la feuille de papier et de la compressibilité de celui-ci (fig. I-2). La masse volumique du papier est obtenue en faisant le rapport du grammage et de l'épaisseur. En tant que support de communication, l'opacité de la feuille est très importante. Les propriétés mécaniques les plus fréquemment usitées sont la résistance à la rupture et à l'éclatement. Le papier est composé essentiellement d'air, d'eau et de fibres de cellulose liées entre elles et formant un réseau. La quantité d'eau dans le papier conditionne considérablement ses caractéristiques mécaniques.



**Figure I-2 : Image de la surface d'une feuille de papier prise au microscope électronique à balayage.**

La fabrication industrielle du papier a beaucoup évolué depuis son invention à nos jours. Le but de ce chapitre est de présenter brièvement sa fabrication moderne sans rentrer dans la spécificité de chaque opération unitaire de la machine à papier, excepté pour le procédé du pressage qui est explicité plus en détail dans la partie I.2. La fin du chapitre s'attarde plus particulièrement sur les feutres, matériaux au centre de l'étape de pressage.

## I.1 La machine à papier.

Les étapes successives de la fabrication moderne du papier sont les suivantes :

- ⊗ collecte et stockage du bois,
- ⊗ traitements préliminaires à la fabrication de la pâte: réduction en dimension et épuration,
- ⊗ production de pâte,
- ⊗ préparation du stock de pâte,
- ⊗ fabrication du papier et traitement de surface si cela est nécessaire,
- ⊗ opération de finition (mise au format désiré).

La machine à papier comprend trois parties essentielles dont les deux premières constituent la "partie humide" (Valette P. et Choudens C. 1987) (fig. I-3):

- ⊗ La formation du matelas fibreux ; il se forme par égouttage sur une ou plusieurs toiles d'une suspension très diluée distribuée par l'intermédiaire de la caisse de tête,
- ⊗ Les presses ; elles ont pour but de retirer un maximum d'eau de la feuille et de consolider sa structure fibreuse par action mécanique,
- ⊗ La sécherie ; elle évapore le reste de l'eau par contact de la feuille avec des cylindres chauffés afin d'atteindre une siccité de 95% environ.

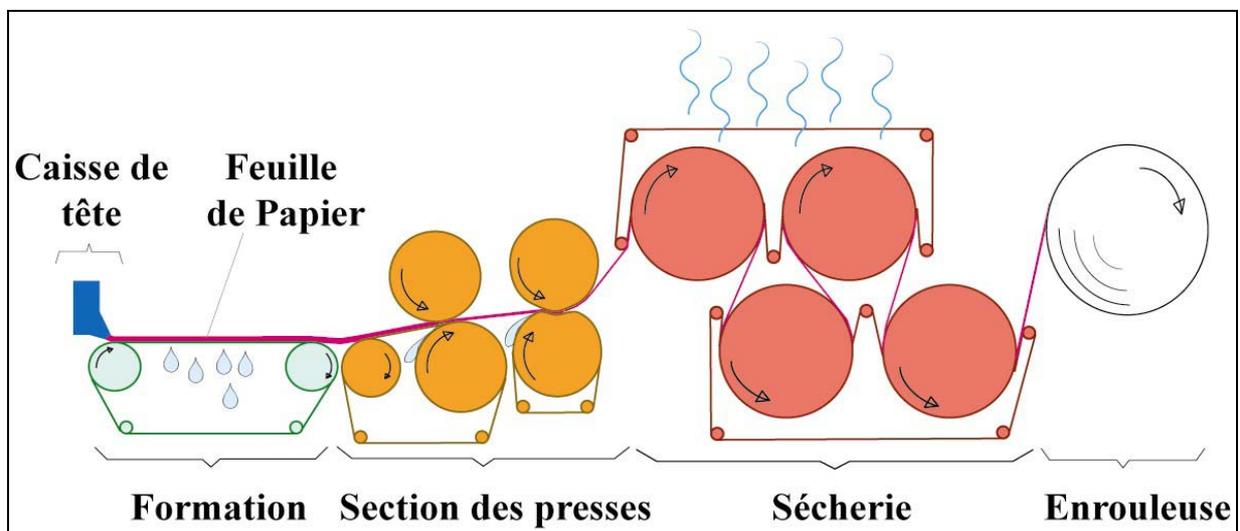


Figure I-3 : Schéma d'une machine à papier.

Décrivons maintenant les principaux organes constituant la machine à papier.

### 1.1 Circuit de tête.

La fonction principale de ce circuit est de fournir à la caisse de tête un débit de pâte constant. Ce circuit permet le réglage de la composition et du débit volumique, le mélange des constituants et la préparation de la pâte avec notamment son épuration et son raffinage. Le raffinage consiste à hydrater, à couper et à défibriller les fibres. Plus une pâte est raffinée, plus la longueur moyenne des fibres est courte. Par conséquent, le raffinage augmente la résistance à l'écoulement du matelas fibreux et limite l'essorage de la feuille. Pour classer les pâtes selon leur niveau de raffinage, l'essai Schopper-Riegler est utilisé industriellement. On parle alors de degré Schopper ( $^{\circ}\text{SR}$ ). Plus une pâte est raffinée (ou grasse) plus son degré Schopper est élevé.

### 1.2 Caisse de tête.

La caisse de tête (cf. figure I-3) est l'organe essentiel de distribution de la suspension fibreuse sur le support filtrant de l'unité de formation du matelas fibreux. La suspension fibreuse entre dans la caisse de tête par l'intermédiaire de conduites à section circulaire, à des vitesses comprises entre 2,5 et 6 m/s. Ce flot de pâte est délivré le plus uniformément et le plus régulièrement possible sur la table de formation à travers une section rectangulaire à une vitesse proche de celle de la toile. Les fonctions principales de la caisse de tête sont :

- ⊗ amortir les pulsations de pression et de débits ainsi que les variations de concentration de pâte à l'entrée,
- ⊗ défloculer la suspension fibreuse en générant une turbulence maîtrisée en échelle et en intensité,
- ⊗ régler le jet formé en contrôlant son épaisseur, sa vitesse et son degré de turbulence,
- ⊗ assurer des réglages indépendants du grammage et de l'orientation fibreuse dans toute la largeur de la feuille.

### 1.3 Partie humide : table de formation ou table plate.

La formation de la feuille sur la table plate s'apparente à un phénomène de filtration. La suspension est filtrée à travers un matelas fibreux en cours de constitution. Cette opération est réalisée sur une toile. Cet habillage est réalisé avec des fils textiles mono-filaments, généralement en polyamide ou polypropylène. Sa longueur varie de 20 à 450 m suivant les machines à papier. Elle influence la rétention des fibres, des fines et des charges. Sa structure influence aussi celle de la feuille à la fois en surface (marquage) et en profondeur (épair) ainsi que la siccité en bout d'unité de formation.

Des organes dépresseurs placés sous la toile améliore le drainage de l'eau. On trouve successivement :

- ⊗ un rouleau de tête situé juste sous la lèvre inférieure de la caisse de tête,
- ⊗ un marbre éventuellement chargé de ralentir l'égouttage pour laisser aux fibres le temps de se répartir uniformément,
- ⊗ une caisse aspirante humide,
- ⊗ des pontuseaux, petits rouleaux creux recouverts de caoutchouc ou de matière plastique (Les pontuseaux sont souvent remplacés par des racles (foils)),
- ⊗ des caisses aspirantes en contact avec la toile.

Lorsque la feuille atteint une siccité de 2% à 4%, les pontuseaux ou racles n'ont aucune action sur l'égouttage de la feuille. Après les caisses aspirantes, la siccité atteint une valeur comprise entre 14% et 18%. À la fin de la formation de la feuille se trouve un cylindre aspirant. Celui-ci entraîne la toile et augmente la cohésion du réseau fibreux ainsi que la siccité. À l'entrée de la section des presses, elle atteint environ 23%.

Des tables de formation à double toiles ont été mises au point dans les années 60. Elles améliorent la formation et la qualité du papier : meilleur épair, similarité des caractéristiques des deux faces de la feuille. Elles permettent également d'augmenter la vitesse des machines réduisant ainsi la consommation d'énergie. La siccité atteinte en bout de l'une de ces unités est de l'ordre de 16 à 22%.

#### 1.4 Section de presses, appelée aussi section des presses.

Le but de la section des presses est d'essorer la feuille de papier. La compression consolide la feuille encore fragile. La quantité d'eau à évaporer en sécherie est ainsi considérablement diminuée. Une étude entreprise auprès de plusieurs papeteries à la fin des années 80 (Cutshall K. et Johnson M. C. 1992) montre que les sections de presses sont composées de 3 à 4 presses (parfois même 5 presses). Lorsque la feuille sort de la section de presses sa siccité est comprise entre 40% et 50 %. Dans une partie ultérieure, l'opération unitaire du pressage sera détaillée.

#### 1.5 Séchage.

Après la section de presses, il ne reste pratiquement plus d'eau libre dans le papier mais uniquement de l'eau adsorbée à la surface de la fibre et de l'eau intra-fibre. Les techniques de pressage ayant atteint leurs limites, l'eau est alors évaporée. Durant le séchage, les liaisons hydrogène entre les fibres sont créées permettant ainsi au papier d'acquérir toutes ses propriétés mécaniques. La siccité de la feuille atteint alors 95% en sortie de sécherie.

#### 1.6 Opérations de finition.

Suivant le type de production, des traitements surfaciques ou mécaniques supplémentaires sont appliqués à la feuille. Parmi ces actions, celles spécifiques au papier impression-écriture sont données à titre d'exemple :

- ⊗ L'encollage (size-press) ; initialement la presse encolleuse était destinée à préparer le couchage des papiers impression écriture par dépôt d'une faible quantité d'amidon. De plus, ce traitement améliore les caractéristiques mécaniques.
- ⊗ Le calandrage ; à la sortie de la sécherie ou de la size press, les faces de la feuille sont plus ou moins rugueuses. Pour diminuer cette rugosité, la feuille est pressée entre des rouleaux lisses.
- ⊗ Le couchage ; pour améliorer les propriétés surfaciques de la feuille en vue de l'impression ou l'écriture, une enduction pigmentaire est déposée à sa surface.
- ⊗ Le découpage ; les bobines de papier sont découpées pour être mises au format désiré.

## I.2 Le pressage.

### 2.1 Description du pressage.

Après l'égouttage, la feuille contenant encore beaucoup d'eau est très fragile. Elle est difficilement manipulable. Afin d'augmenter sa cohésion, elle est comprimée sur un support alvéolaire pour d'une part, en exprimer l'eau et d'autre part consolider sa structure. Lors de la compression, le volume de vide dans la feuille diminue. Lorsque la quantité d'eau devient plus importante que ce volume, l'eau migre alors vers la capacité alvéolaire externe. Lors de la diminution de la contrainte appliquée, le volume de la feuille augmente créant une aspiration. La feuille peut être remouillée par l'eau expulsée précédemment. De plus à la séparation de la feuille des surfaces pressantes, le film d'eau présent aux interfaces peut venir préférentiellement vers le papier plutôt que vers les deux autres surfaces car les pores du papier sont beaucoup plus petits que ceux du feutre ou du rouleau presseur. Ce second remouillage dépend, parmi d'autres raisons, des tensions superficielles en présence.

Dans une section de presses, la feuille humide accompagnée d'un ou plusieurs supports alvéolaires appelés feutres est comprimée entre des rouleaux revêtus d'un revêtement. Ceci provoque l'expression de l'eau ainsi que la consolidation de la feuille et son support pendant le pressage. La zone de déformation entre les rouleaux est appelée la pince.

Si l'on considère une approche descriptive, les conséquences du pressage sur la feuille de papier sont :

- ⊗ macroscopiquement, une diminution de la quantité d'eau dans la feuille de papier et une diminution de l'épaisseur correspondant à une densification du matelas fibreux.
- ⊗ microscopiquement, une augmentation du nombre et de la surface des contacts entre les fibres. Ainsi, la surface des fibres réfléchissant la lumière diminue et par conséquent la diffusion de la lumière à travers le papier aussi. L'opacité de la feuille diminue également. Le pressage contribue ainsi non seulement à modifier les propriétés mécaniques de la feuille de papier mais aussi ses caractéristiques optiques.

De toutes ces conséquences et du point de vue économique, l'augmentation de la siccité est la plus importante pour la fabrication de papier. En effet, retirer l'eau par essorage consomme nettement moins d'énergie et nécessite moins de temps que par évaporation. Ainsi, l'amélioration de l'efficacité du pressage peut avoir comme conséquence un séchage plus court (cadence de production plus élevée) ou moins intensif (consommation en énergie moins grande). Cependant, l'influence du pressage sur les caractéristiques du papier doit être bien maîtrisée pour fabriquer un produit avec les propriétés désirées.

Le papetier peut réaliser des économies importantes en optimisant sa section de presses. À titre d'exemple une hausse de 0,25% de la siccité après la section des presses peut correspondre à une diminution de 1% de la consommation de vapeur soit une économie de 50 000 € par an (Yeager R. 1997).

Les avancées technologiques et scientifiques du pressage sont développées ci-après chronologiquement.

## 2.2 Veille technologique.

Cette veille technologique est guidée essentiellement par des travaux synthétisant l'histoire et les tendances du pressage (Paulapuro H. 1990; Paulapuro H. et Nordman L. 1991; Reese R. A. 1991). Chaque technologie est décrite par ses principales caractéristiques. Habituellement pour comparer deux sections de presse, le terme d'impulsion de pressage est employé. Celui-ci dépend directement de la durée et de l'intensité du pressage. Son calcul est présenté dans la figure I-4. Après la description des différentes technologies, leurs impulsions de pressage seront comparées (fig. I-12)

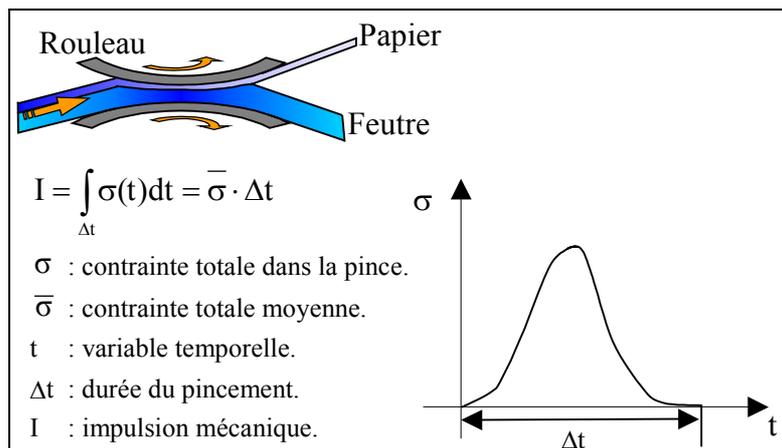


Figure I-4 : Calcul de l'impulsion d'une pince.

## 2.2.a Presses à écoulement longitudinal ou presses pleines.

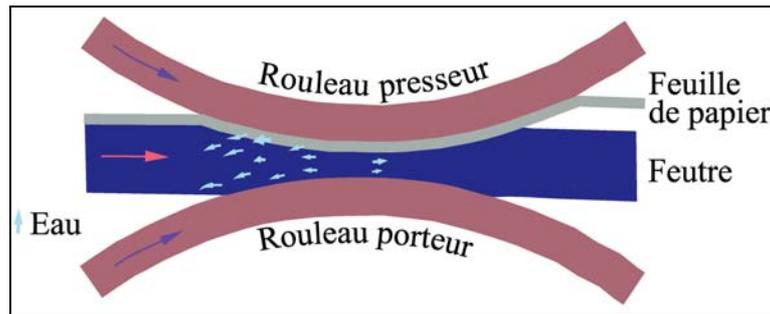


Figure I-5 : Illustration du fonctionnement d'une presse pleine.

Les presses pleines ont équipé les premières machines à papier (XIX<sup>ième</sup> siècle). La feuille de papier supportée par une capacité alvéolaire appelée feutre est essorée entre deux rouleaux de granit (fig. I-5). Cette technique très simple est encore employée de nos jours. La siccité de la feuille après pressage est étudiée sur des presses de laboratoire en fonction du papier produit et des feutres utilisés. Les résultats de ces expériences renseignent sur les limites du pressage. Elles montrent d'une part que l'efficacité du pressage de la feuille est influencée par les caractéristiques du feutre et d'autre part qu'une siccité de l'ordre de 70% à 80% peut être obtenue (Heller H. H. et Tewksbury C. G. 1972). De plus, ces travaux montrent que seule l'eau extra-fibre est extraite lors d'un pressage sans apport de chaleur (Wiseman N. 1976). Les mesures de siccité réalisées sur différentes machines à papier montrent que la siccité est souvent comprise entre 45% et 50% en sortie des sections de presses. La différence importante entre les valeurs de la littérature et celles industrielles peut être imputée aux vitesses de déformation très faibles utilisées pour les essais expérimentaux.

En utilisant les presses pleines, si la pince est saturée, il peut exister un écoulement d'eau vers l'amont de la presse. Dans une étude expérimentale sur le pressage d'un feutre seul, Asköf (Asköf C. A., Larsson K. O. & al. 1964) montre que cet écoulement est la conséquence de l'existence d'un maximum de pression hydraulique avant le milieu de la pince. Le passage de la feuille humide dans la presse est parfois comparé à un coin hydraulique (Hintermaier J. C. 1963). La technologie des presses pleines est limitée par la pression du fluide qui augmente considérablement dans la feuille avec la cadence de production pouvant conduire à la destruction de la structure fibreuse. Ce phénomène physique est appelé « écrasé » (crushing). La vitesse de passage de la feuille et du feutre dans la pince, le degré de raffinage de la pâte et le grammage de la feuille aussi bien que la résistance à l'écoulement du feutre et de la feuille influencent fortement son apparition (MacGregor M. A. 2001). Pour éviter ce problème et ainsi autoriser des vitesses de production plus importantes, le chemin hydraulique doit être réduit. Ceci est à l'origine de la conception des presses aspirantes, des presses rainurées et des presses à trous borgnes décrites ci-après.

## 2.2.b Presse aspirante.

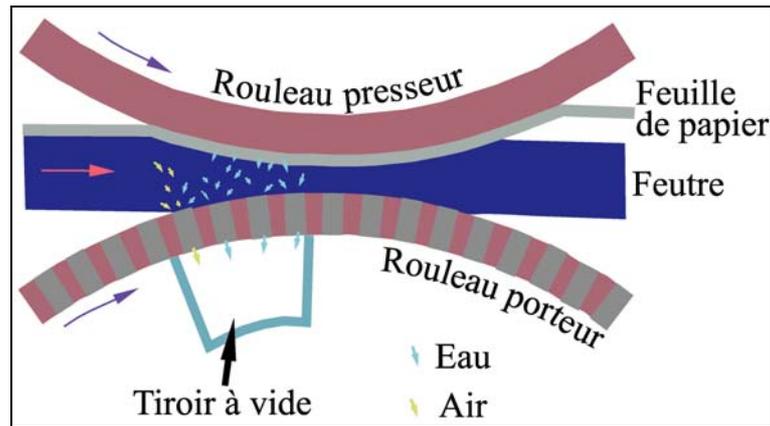


Figure I-6 : Illustration du fonctionnement d'une presse aspirante.

Afin de diminuer la pression hydraulique dans la zone de pincement des presses, la société Millspaugh, en 1909, conçoit un cylindre porteur perforé (fig. I-7) et équipé dans la zone de compression d'un tiroir sous vide (fig. I-6). Ce tiroir a deux fonctions. La première consiste à récupérer l'air chassé par la compression du feutre et la seconde à diminuer le chemin hydraulique. La pression linéique créée entre les rouleaux est plus élevée (40 à 70  $\text{kN.m}^{-1}$ ). Toutefois, lorsque la cadence de la production devient trop élevée, la force centrifuge s'exerçant sur le liquide dans les perforations devient supérieure à la force d'aspiration : l'eau remplit les perforations puis remouille le feutre. L'utilisation d'un circuit de vide rend cette technologie plus complexe, plus bruyante et moins économique. Les perforations du rouleau porteur (fig. I-7) sont sources d'encrassement. Elles n'autorisent pas l'utilisation de pression linéique très élevée. De plus, ces perforations sont à l'origine de la création d'empreintes (shadow marking) sur le papier qui sont d'autant plus marquées que la pression linéaire est importante. Lors de la fabrication de papier pour l'impression écriture, ce phénomène est crucial. Actuellement, lorsque cette technologie est employée, elle est installée en première presse car elle permet un gain de siccité important par rapport aux technologies classiques.

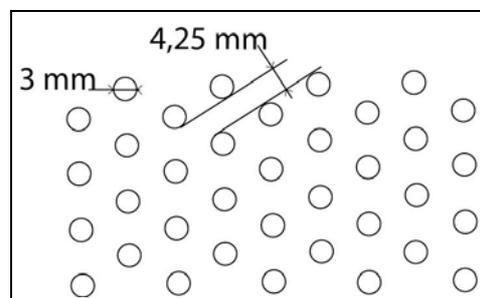


Figure I-7 : Carte des perforations sur un rouleau de presse aspirante.

## 2.2.c Presse à toile.

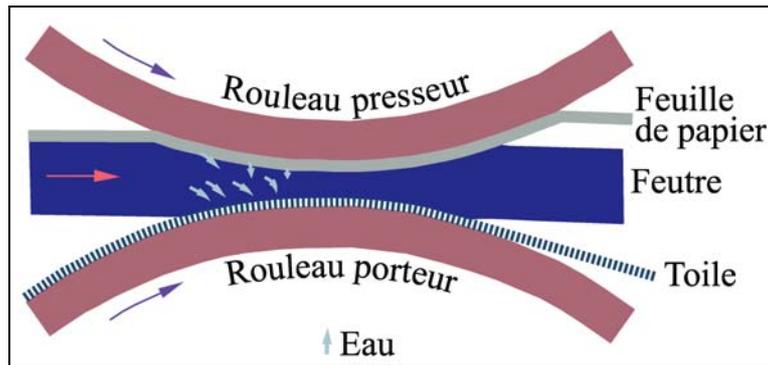


Figure I-8 : Illustration du fonctionnement d'une presse à toile.

Développée en 1962, une toile tissée est insérée entre le feutre et le rouleau porteur créant ainsi une capacité alvéolaire supplémentaire (fig. I-8). La toile récupère l'eau dans ses mailles, puis, est séparée du feutre dès sa sortie de la zone de pincement pour limiter le remouillage toile feutre. L'utilisation d'une telle technologie permet l'amélioration de presses pleines augmentant ainsi leurs rendements en autorisant l'utilisation de pressions et de vitesses élevées sans risque d'écrasé. Toutefois, le circuit de toile est encombrant et rend plus compliqué le changement du feutre. De plus, l'existence de friction entre le rouleau et la toile accélère l'usure du cylindre porteur.

## 2.2.d Presse rainurée.

Pendant de nombreuses années, les presses aspirantes sont considérées comme le système de pressage le plus performant. Tous les efforts se concentrent sur l'amélioration des feutres et des rouleaux ainsi que sur l'influence d'un apport de chaleur. Bien que complexe à mettre en œuvre, ce système est plus efficace que les autres technologies existantes. En 1964, Beloit met au point la Venta-press (Vented press) ou presse rainurée. Le rouleau en contact avec le feutre est pourvu de rainures hélicoïdales de largeur 0,25 à 0,75 mm, de profondeur 2,5 mm et de pas 3 mm (fig. I-9). L'eau éliminée remplit ces rainures qui sont vidées par la force centrifuge, par des racles ou par un jet d'eau haute pression. Ce système permet l'utilisation de pressions très élevées sans risque d'endommager la feuille (Justus E. J. 1964).

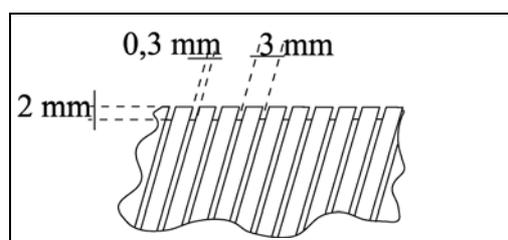


Figure I-9 : Schéma d'un rouleau porteur d'une presse rainurée.

Les premières presses rainurées sont équipées de revêtements en caoutchouc, qui étant trop fragiles et offrant des rainures trop déformables ont fait place à des revêtements en acier inoxydable. Néanmoins, lors de l'utilisation de charge linéique importante, les rainures peuvent rester déformées rendant ainsi difficile leur nettoyage. Lorsque la pression hydraulique devient trop importante apparaissent des empreintes visibles par transparence (groove marking) (MacGregor M. A. 1985) car les zones de la feuille au-dessus de la partie pleine du rouleau porteur sont plus denses. Ces presses sont souvent placées à partir de la deuxième presse lorsque cette technologie est utilisée. Rempel (Rempel N. C. 1972) étudie les paramètres influençant l'efficacité de ce type de presse, et en particulier, la disposition et la taille des rainures. Fekete (Fekete E. Z. 1975) étudie les performances d'une presse rainurée en fonction des caractéristiques des feutres utilisées. Les meilleurs résultats sont obtenus pour des feutres avec des voiles stratifiés (cf. I.3.4.b).

#### 2.2.e Presse à trous borgnes.

Pour recueillir l'eau exprimée du feutre et de la feuille, des trous non débouchants (borgnes) sont utilisés. Ceux-ci d'un diamètre de 2 mm, et profonds de 3 mm, sont uniformément répartis sur la surface extérieure du cylindre porteur (fig. I-10) augmentant ainsi la surface ouverte de 15% à 20% par rapport à un rouleau rainuré. Le nettoyage des trous se fait grâce à la force centrifuge, des jets d'air, des racles et par aspiration. Ce type de presse peut être mis en place à n'importe quel position de la section des presses. Comme pour les presses rainurées, des empreintes visibles par transparence peuvent apparaître à cause de la pression hydraulique. Afin de prévoir ce phénomène, Fekete (Fekete E. Z. et Wiebe K. M. 1999) introduit le concept de masquage (bridging), i.e. le feutre masque l'influence des trous.

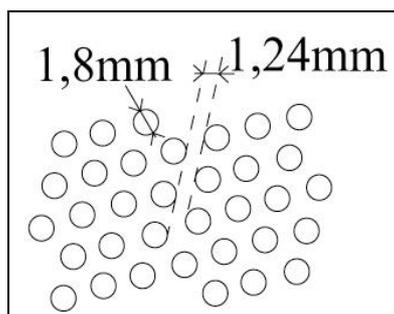


Figure I-10 : Schéma d'un rouleau porteur d'une presse à trous borgnes.

---

*2.2.f Presse à manchon rétrécissant.*

Une augmentation de la capacité alvéolaire dans la zone de pincement pouvant augmenter la quantité d'eau exprimée de la feuille, les cylindres de presses ont alors été enveloppés d'un manchon textile tissé en continu. Après l'installation du tube sur le rouleau, l'ensemble est plongé dans l'eau chauffée à 60°C ce qui a pour effet de provoquer le rétrécissement du manchon tissé. Aucun glissement entre le manchon et le cylindre n'est possible. Le nettoyage du manchon se fait grâce à la force centrifuge, des jets d'air, des racles et des caisses aspirantes.

*2.2.g Presse à pince étendue.*

Une autre méthode pour augmenter l'impulsion mécanique de pressage est d'utiliser un rouleau avec un grand diamètre (jusqu'à 2,5 m). Une telle presse pourvue de revêtements souples, et utilisée avec de fortes pressions linéiques, peut donner une longueur de zone de pincement variant de 50 à 100 mm. Cette technique est appelée presse à grand diamètre (high impulse press). Elle est bien adaptée au pressage des papiers épais comme par exemple le carton (Foulger M. F. 1995). La sollicitation mécanique imposée aux rouleaux est alors bien différente de celle rencontrée dans les sections de presses traditionnelles, et nécessite des revêtements spéciaux (Cheatham J. F. 1984).

Pour allonger la pince, une autre solution est de presser la feuille et le feutre directement sur un support souple comme par exemple une courroie. La longueur de la pince peut atteindre 45 cm (Busker L. H. 1971). La siccité atteint jusqu'à 54% pour une vitesse de 15 cm.min<sup>-1</sup> et une pression de 2,76 MPa. Cette méthode n'a pas été développée industriellement car les presses à sabots (cf. 2.2.i) s'avèrent plus performantes.

*2.2.b Presse à double feutre.*

Le pressage traditionnel induit une dissymétrie des caractéristiques surfaciques de la feuille de papier car elle est en contact soit avec le rouleau, soit avec le feutre. Cette dissymétrie persiste même après le calandrage (Pikulik I. I. et MacDonald J. D. 1987). Elle peut être réduite en intervertissant les rouleaux presseur et porteur entre deux sections de presse successives (Wicks L. 1982) ou bien en utilisant une presse à double feutre. Cette deuxième technique est adaptée au pressage de papier de grammage élevé ou très raffiné (Rogut R. 1995), (Royo M. A. et Berggren C. O. 1979). Le double feutrage allonge la zone de pincement et diminue le trajet à parcourir par le fluide dans la feuille. Ce système élimine la dissymétrie entre les deux faces de la feuille mais n'améliore pas leur état de surface. Souvent, le rouleau inférieur est rainuré pour améliorer l'essorage. Cependant l'utilisation de cette technologie double le phénomène de remouillage rendant nécessaire une surveillance attentive de la feuille.

2.2.i Presse à sabot.

Le rouleau porteur est remplacé par un sabot dont la forme concave épouse parfaitement la forme convexe du rouleau supérieur (fig. I-11). Ainsi, la zone de pincement est allongée et par conséquent, la feuille est pressée plus longtemps d'où un gain de siccité plus élevé.

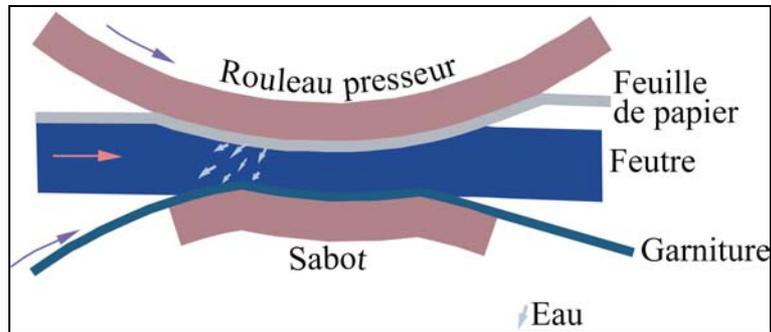


Figure I-11 : Illustration du fonctionnement d'une presse à sabot

Suivant le profil du sabot, la distribution de pression peut être modifiée. La longueur de la pince est alors de 150 à 300 mm. Ce type de presse permet de mieux réguler l'épaisseur de la feuille. Toutefois, dans le cas des papiers minces, des travaux expérimentaux (Pikulik I. I. 1999) montrent que l'emploi de cette technologie diminue sensiblement certaines propriétés mécaniques telles que la résistance à l'éclatement. Cette technique peut être utilisée pour une large gamme de papiers et de cartons (Ilvespää H. 1996; Lange D. 1996; Worsick A. 1994). La comparaison des impulsions mécaniques de pressage avec une presse classique à rouleaux et une presse à sabot est présentée dans la figure I-12.

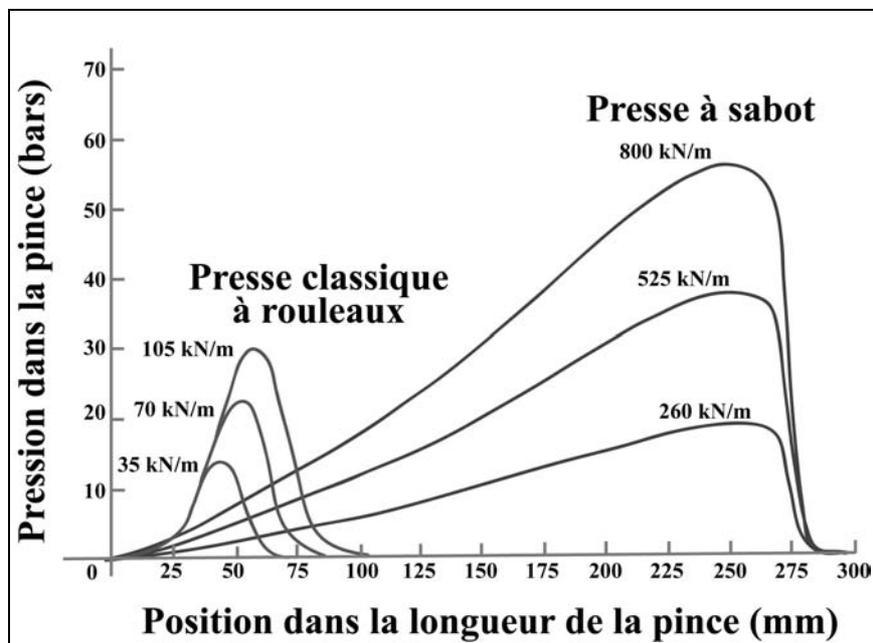


Figure I-12 : Comparaison de l'impulsion mécanique de pressage d'une presse pleine et d'une presse à sabot. D'après (Lange D. 1996).

*2.2.j Pressage à chaud.*

Pour augmenter l'efficacité du pressage, il est intéressant d'augmenter la température dans la zone de pincement. Ceci a pour effet, d'une part, de diminuer la viscosité du fluide et la tension superficielle de l'eau. Ainsi, l'écoulement à travers la feuille et le feutre est facilité et le remouillage est réduit. D'autre part, le module d'élasticité du milieu fibreux est plus faible ce qui le rend plus compressible améliorant ainsi l'expression de l'eau. En moyenne, toutes sortes de papier confondues, si la température augmente de 8 à 10°C, l'augmentation correspondante de siccité est de 1% (Fall Y. S. 1990). De plus, le temps d'échauffement de la feuille est plus court, ce qui permet de faire des économies pendant le séchage. La modification des presses existantes peut se faire par ajout d'éléments chauffants comme des boîtes à vapeur (steam boxes) ou des rouleaux chauffants directement dans la presse (Talja R. 1996; Yli-Kaupila J. 1993). En utilisant de tels dispositifs la siccité de la feuille peut atteindre 60% en sortie de section de presses (Walker K. 1990).

*2.2.k Pick up.*

Lorsque la feuille quitte la table de formation (fig. I-3) pour la section des presses, elle n'est plus soutenue par une toile. Ce passage appelé tirage ouvert, est souvent la source de casse de la feuille et limite la vitesse de production. Le système pick-up permet de prendre la feuille à la sortie de la formation. Elle adhère au feutre par capillarité, ce qui limite le grammage de papier pouvant être transporté. Le tirage ouvert est ainsi supprimé et des cadences de production plus élevées sont autorisées. Les feutres utilisés pour le pick-up doivent offrir peu de résistance à l'écoulement et une surface favorisant l'absorption capillaire.

*2.2.l Conclusions et perspectives.*

Suivant le cahier des charges de la production, plusieurs technologies peuvent convenir pour la fabrication mais il n'existe pas de presse universelle autorisant la fabrication de toutes les sortes de papier possibles. Pour augmenter l'efficacité du pressage, des éléments chauffants peuvent être disposés dans la section des presses. La frontière entre cette section et la sécherie devient, alors, moins distincte. Dans cette direction, ces dernières années, le pressage à impulsion thermique est mis au point. Il combine à la fois le pressage et le séchage. Le rouleau presseur en contact avec la feuille est chauffé à une température supérieure à 150°C. Plusieurs hypothèses sur les mécanismes de l'expression de l'eau existent. La première est que l'eau est évaporée comme lors du séchage. Le procédé se résume alors en un pressage et un séchage combinés (Mackless E. A. 1988). La seconde hypothèse est que l'eau au contact du rouleau chauffant est transformée en vapeur. Le front de vapeur créé chasse le liquide vers le feutre (Orloff D. I., Patterson T. F. & al. 1998-1998).

Les premiers essais de pressage à impulsion thermique (Back E. L. et Swenson R. 1981) montrent que cette technique augmente la densité de la feuille mais réduit fortement le module d'élasticité (assouplissement des fibres dû à la température élevée) ce qui, pour certaines sortes de papier, est un inconvénient. En utilisant cette technique sur une presse à large temps de contact, les liaisons entre les fibres deviennent plus résistantes (Horn R. A. et Setterholm V. C. 1983; Setterholm V. C. 1979). Néanmoins, pour des cadences de production soutenues, des problèmes d'éclatement ou de délamination apparaissent en sortie de presse. De plus, il faut trouver des habillages résistants à de telles températures (Talja R. 1996). Des essais sur machines de laboratoires à des vitesses industrielles pour différentes sortes de papier montrent que ces presses sont performantes et prêtes à être commercialisées dans un proche avenir (Orloff D. I., Phelan P. M. & al. 2000; Rigdahl M., Bäckström M. & al. 2000).

Ce procédé permettant de réaliser des économies d'énergie intéressantes, des industriels (Valmet, Albany Nordiskafilt) et des laboratoires universitaires (LGP2 (Laboratoire de Génie des Procédés Papetiers) ou Université de Porto) et privés (STFI (centre technique du papier suédois)) se sont associés dans un projet européen (Joule III Project JOECT92). Cette thèse s'inscrit dans ce cadre. L'objectif de notre contribution dans ce projet est de fournir aux autres partenaires des données concernant la résistance à l'écoulement de feutres de papeterie pour différents niveaux de compression.

### 2.3 Veille scientifique.

La première partie de cette veille scientifique met en place les principaux mécanismes du pressage et les évalue qualitativement. La deuxième montre quelques évaluations quantitatives de leur importance. La dernière partie est centrée sur la modélisation de la section des presses.

#### 2.3.a Théorie.

La recherche scientifique concernant le pressage débute au début du XX<sup>ième</sup> siècle. Les travaux de Wrist P. E. (Wrist P. E. 1964), de Walhstöm P. B. (1968) (Wahlström B. J., Johnson A. & al. 1969) et de MacGregor ((MacGregor M. A. 1989-2001)) synthétisant l'état des connaissances à différentes périodes du siècle passé ont facilité cette veille scientifique.

Les premiers pas réalisés dans l'étude de la physique du pressage se feront en utilisant les théories validées en mécanique des sols. Les études sur le pressage suivent d'abord une approche qualitative ou empirique. À partir d'observations in-situ, les principaux mécanismes agissant dans la zone de pincement de la presse seront déduits.

Ainsi, Nissan (Nissan A. H. 1954), observant une presse aspirante, fait les hypothèses suivantes : à l'entrée de la pince, le feutre étant plus compressible que la feuille, il subit toute la déformation. L'eau qu'il contient est ainsi exprimée. À la sortie de la pince, son expansion crée une dépression aspirant l'eau de la feuille. Le remouillage n'est pas pris en compte dans cette description. Cette théorie a été invalidée par plusieurs travaux cités dans la synthèse de Wrist (Wrist P. E. 1964). Après l'observation et l'étude de presses aspirantes utilisées pour produire du papier journal, Wahlström (Wahlström B. J. 1960) fait les constatations suivantes : à l'entrée de la pince, ni le papier ni le feutre ne sont saturés ; pendant la compression le papier atteint la saturation avant le feutre. Lorsque la pression hydraulique augmente, elle équilibre la pression totale appliquée et la pression structurale (loi de Terzaghi). La création et l'augmentation de la pression hydraulique tout au long de la compression sont sources d'un écoulement d'eau. Suivant les conditions aux limites (surfaces lisses ou non) cet écoulement peut s'effectuer vers l'entrée de la pince ou est transversal (vers les trous d'aspiration dans le cas d'une presse aspirante). L'équilibre des contraintes hydrauliques et structurales, et l'apparition d'un gradient hydraulique excessif permettent d'expliquer le shadow marking et les écrasés. Contrairement à Nissan, Wahlström postule que des échanges d'eau entre la feuille et le feutre existent pendant la phase de compression. De plus, pour ce dernier, le remouillage de la feuille a lieu pendant l'expansion du papier et du feutre. En effet, les pores de la feuille étant beaucoup plus petits que ceux du feutre, la feuille a tendance à « aspirer » l'eau du feutre lors de la sortie de la presse.

Les travaux d'Asklöf C. A. (1964) (Asklöf C. A., Larsson K. O. & al. 1964) et de Wilder J.E. (Wilder J. E. 1967) vont dans le même sens que les hypothèses de Wahlström. Étudiant le pressage d'un feutre humide seul entre deux rouleaux lisses, Asklöf observe un écoulement d'eau en amont de la presse. Les mesures d'humidité du feutre montrent qu'un écoulement existe dans la section la plus étroite du pressage. Un maximum de pression hydraulique est localisé entre l'entrée et la section la plus étroite de la presse. L'auteur considère alors que l'écoulement dans la pince d'une presse pleine est identique à celui dans une conduite convergente. Dans leur modèle unidimensionnel, tenant compte de la conservation de la quantité d'eau et de la loi de Darcy modifiée par un terme d'inertie, il modélise qualitativement la vitesse moyenne de l'eau dans la pince ainsi que la répartition de pression hydraulique. La feuille n'est pas prise en compte dans ce modèle car son épaisseur et la quantité d'eau qu'elle véhicule sont beaucoup plus faibles que celles du feutre. Une relation de type Kozeny Carman relie la résistance à l'écoulement à la déformation du feutre.

Cependant, cette prédiction de l'évolution de la pression hydraulique ne reflète pas la réalité du passage du papier car elle ne tient pas compte de la rhéologie du feutre et du papier. Nilsson et Larsson (Nilsson P. et Larsson K. O. 1968) ajoutent aux travaux d'Asklöf les rhéologies du feutre et de la feuille. Ils montrent alors que les maxima des déformations et des contraintes ne coïncident pas toujours (fig. I-13).

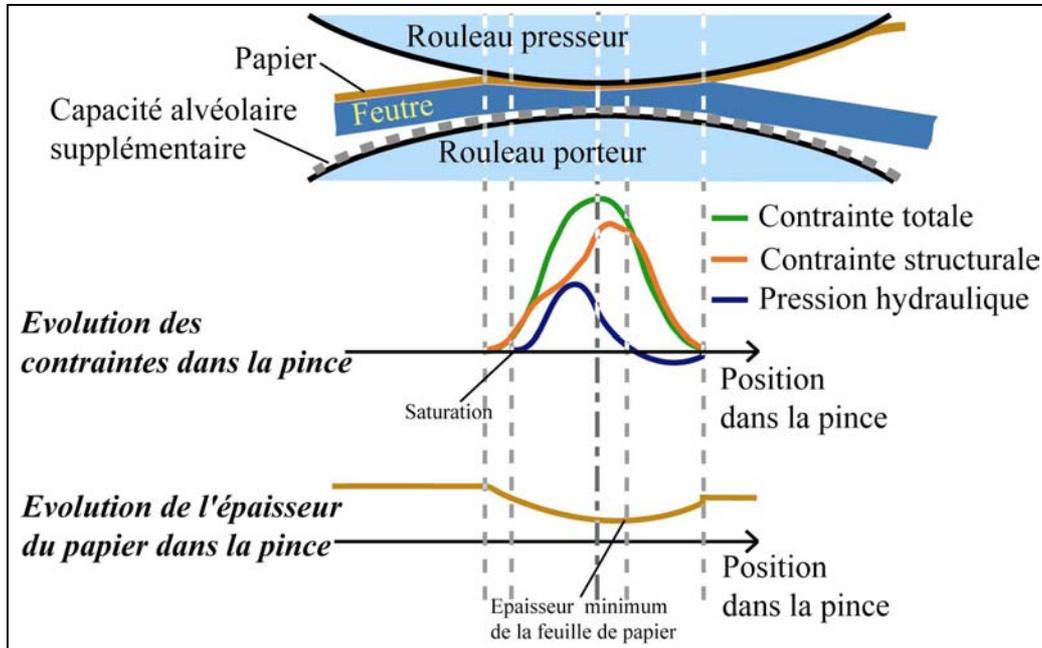


Figure I-13 : Distributions des contraintes et évolution de l'épaisseur de la feuille de papier lors du pressage dans une presse aspirante (d'après Nilsson et Larsson 1968).

Les travaux de Nilsson et Larsson mettent en évidence deux comportements de la feuille lors du pressage :

- ⊗ un comportement contrôlé par la pression totale : la siccité après le pressage dépend peu de la cadence de production mais fortement de la contrainte de compression,
- ⊗ un comportement contrôlé par l'écoulement : la pression hydraulique augmente considérablement avec la pression de pressage et la vitesse de passage de la feuille dans la pince (cas des papiers où le grammage est élevé, ou bien, lorsque la pâte est très raffinée). C'est dans ce cas que le risque d'écrasé est le plus important.

Après ces premiers modèles qualitatifs sur le pressage, d'autres apparaissent, tantôt, empiriques basés sur des travaux expérimentaux, tantôt théoriques utilisant les relations classiques de la mécanique des milieux poreux. Tous les modèles théoriques du pressage à température ambiante suivent la même approche. Cette approche macroscopique tend à considérer un milieu homogène et continu et utilise par conséquent les outils de la mécanique des milieux continus. Les équations de la thermodynamique, les conservations des matières et de la quantité de mouvement sont vérifiées pour chaque milieu.

Les lois rhéologiques du feutre et de la feuille humide relient alors la contrainte totale à la déformation du matériau concerné. La contrainte totale est exprimée en fonction de la contrainte sur la structure et de la pression hydraulique. La conservation de la matière renseigne quant à elle directement sur le champ de déplacement si le milieu est incompressible, ou bien fournit une relation en champ de déplacement et masse volumique du milieu. Cependant dans cette interprétation, il n'est pas possible de trouver une relation entre la pression hydraulique et le déplacement de l'eau. Il est nécessaire de trouver une équation supplémentaire comme celle de Darcy.

Le paragraphe suivant présente les avancées faites pour essayer de caractériser les mécanismes du pressage.

### *2.3.b Travaux expérimentaux.*

Pour caractériser les mécanismes décrits dans la partie précédente, les rhéologies des matériaux entrant en jeu dans le pressage (papier, feutre et revêtement des rouleaux) sont étudiées seules ou simultanément. Les travaux portant sur la résistance à l'écoulement du feutre ou du papier seront décrits dans le chapitre suivant. Connaissant le comportement de chaque élément, il ne reste plus qu'à modéliser l'ensemble. Pour déterminer les caractéristiques rhéologiques de la feuille humide et du feutre humide, des presses à plateaux peuvent être utilisées. Des travaux complémentaires utilisant des presses à rouleaux convenablement instrumentées apportent aussi de précieux renseignements relatifs aux comportements rhéologiques du feutre et du papier. Dans les études rhéologiques utilisant une presse à plateaux, le matelas fibreux humide est souvent considéré comme homogène. Le comportement est assez bien représenté par un modèle viscoélastique aussi bien pour le papier (Davis E. J., Stratton R. A. & al. 1983; Springer A. M., Waller M. H. & al. 1989) que pour le feutre. Dans les études concernant les feutres humides ou secs, la contrainte appliquée sur le feutre est reliée à la déformation (Swain G. E. 1980) ou à la porosité afin de prédire la pression à partir de laquelle il est saturé (Luciano W. A. 1983). Lorsque les feutres utilisés sont secs, les propriétés mesurées ne sont pas transposables au feutre humide car la lubrification des contacts inter-fibres n'est pas prise en compte.

Quelques études considèrent un milieu constitué de deux phases, l'une solide, l'autre liquide. Ce type d'étude est réalisé sur les feutres ou bien sur des feuilles de papier. Concernant le feutre humide, le comportement dynamique est relié à la contrainte structurale et non à la contrainte totale (El Hosseiny F. 1990). Le modèle n'est alors plus viscoélastique mais élastique non linéaire.

Les feutres étudiés sont préalablement rodés et les mesures rhéologiques sont réalisées sur un cycle de compression relaxation. Les résultats montrent que la compaction du feutre est relativement lente.

Pour les travaux concernant le papier, lors de sa compression sur une toile métallique, la densité de la feuille est reliée à la contrainte totale et à la pression hydraulique (Carlsson C., Lindström T. & al. 1982). Les résultats de ces travaux montrent que le maximum de pression hydraulique peut aussi bien se situer avant qu'après le maximum de contrainte totale. Plus l'efficacité du pressage est influencée par la compression, plus ce maximum de pression hydraulique est atteint rapidement. La densification maximale de la feuille se produit alors toujours après le maximum de contrainte totale. De plus, ce maximum de densité est atteint plus lentement lorsque le pressage est contrôlé par l'écoulement. Ceci va à l'encontre des interprétations de Walhstrom (Wahlström B. J. 1960) et de Nilsson et Larsson (Nilsson P. et Larsson K. O. 1968) si l'on considère qu'elles prédisent que le maximum de pression est atteint pour la déformation maximale.

En instrumentant une presse à rouleau de laboratoire avec des capteurs de pression, les évolutions de la pression hydraulique et de la contrainte structurale peuvent être mesurées. Dans ses travaux sur l'évolution de la contrainte locale et de la pression hydraulique pendant le pressage de feutre seul, Beck (Beck D. A. 1980-1983), montre que les dispersions des mesures sont très élevées lorsque le capteur de pression utilisé a un diamètre de l'ordre du millimètre. Ces dispersions importantes des mesures in-situ de la contrainte et de la pression hydraulique sont essentiellement dues aux non-uniformités de la surface du feutre. L'amplitude des variations de pression totale est telle qu'il est impossible de valider la théorie. Le feutre humide a un comportement visqueux. Les différents profils de pression hydraulique sur toute la longueur de la pince (Beck D. A. 1983) permettent de mettre en évidence le résultat suivant : la pression hydraulique augmente rapidement lorsque la siccité à l'entrée est suffisante pour saturer la pince.

Le feutre n'applique pas une contrainte uniforme sur la feuille (Beck D. A. 1980). Les problèmes de la répartition de la pression entre le feutre et la feuille sont soulevés par Yamamoto (Yamamoto H. 1978) qui étudie son influence sur l'efficacité du pressage. Sze (Sze D. H. 1986) poursuit ces travaux et essaie de quantifier le rôle du feutre en effectuant des relevés d'empreintes de la surface des feutres en contact avec le papier.

---

En considérant l'équilibre des contraintes dans la feuille et les conditions aux frontières de la feuille, la pression hydraulique est moins importante du côté de l'évacuation de l'eau (coté feutre). Par conséquent, suivant l'écoulement existant dans la presse, la feuille sera fabriquée avec des zones plus denses que d'autre (effet d'envers). Ce concept de stratification explique les phénomènes de shadow marking et de groove marking (MacGregor M. A. 2001). La stratification de la feuille est détaillée dans (Burns J. R., Lindsay J. D. & al. 1992; Lindsay J. D. et Brady P. H. 1993; Vomhoff H., Martinez D. M. & al. 2000; Wicks L. 1982 ).

D'autres études portent sur des aspects différents du pressage comme par exemple la séparation de la feuille lorsqu'elle quitte la pince (Pikulik I. I., MacDonald J. D. & al. 1993).

Pour optimiser l'efficacité de la presse, il est impératif de nettoyer le feutre. Des buses lavantes et des rinceurs sont alors installés ainsi que des caisses aspirantes pour diminuer la siccité du feutre à l'entrée de la presse (Baker G. L. et Eric C. E. 1999).

### *2.3.c Travaux numériques.*

Historiquement, les modèles sont surtout qualitatifs puis avec l'amélioration des capteurs électroniques et la montée en puissance des moyens informatiques, les modèles s'affinent et deviennent quantitatifs. Si certaines études tentent de prédire le rendement de la presse considérant le comportement de chaque matériau intervenant lors du pressage, d'autres ne prennent en compte que la globalité du pressage. Ainsi, les siccités de la feuille et du feutre (Sweet J. S. 1961) ou de la feuille seule (DeCrosta E. F. et Plaisted W. E. 1978), sont reliées aux paramètres de pressage pour en prédire l'efficacité. Westra (Westra H. A. 1975) propose un modèle unidimensionnel pour modéliser le pressage du papier et du feutre. L'originalité de ce modèle est qu'il relie le taux d'humidité du papier à la contrainte structurale. Connaissant la distribution de contrainte et le taux d'humidité de la feuille en entrée de la pince, la prédiction du taux d'humidité de la feuille en sortie est alors possible. Il propose alors de faire quelques hypothèses simplificatrices en particulier de considérer que la résistance à l'écoulement du feutre est nulle ce qui diminue le nombre de paramètres. Mais aucune solution au problème réel n'est proposée par manque de données sur la compressibilité et la perméabilité du feutre et du papier.

Ce modèle est amélioré par Kerekes et MacDonald (Kerekes R. J. et MacDonald J. D. 1991; MacDonald J. D. et Kerekes R. J. 1991). Dans ce nouveau modèle empirique appelé modèle à perméabilité décroissante (cf. équation n°I:1), la perméabilité du papier suit la loi de Kozeny Carman (cf chap. II). Il ne prend en compte que la feuille et l'impulsion mécanique de pressage. L'influence du feutre est négligée.

$$\frac{m}{m_o} = \left[ 1 + \left( \frac{n \cdot m_o^n \cdot A \cdot I}{W^2} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{Équation I:1}$$

où  $m$ , le taux d'humidité de la feuille,  
 $m_o$ , celui à l'entrée,  
 $I$ , l'impulsion de pressage,  
 $n$ , le coefficient de compressibilité,  $W$  le grammage du papier produit,  
 $A$ , paramètre reflétant la résistance à l'écoulement du papier.

Les paramètres  $n$  et  $A$  servent à ajuster ce modèle empirique aux résultats expérimentaux. La prédiction de faibles changements dans l'opération de pressage est alors possible, comme par exemple, l'augmentation de l'impulsion de pressage ou la modification du taux d'humidité en entrée de la presse. Cependant pour améliorer leur prédiction, les auteurs ajoutent un nouveau paramètre à leur modèle, inspiré par les travaux de Sweet (Sweet J. S. 1961), pour prendre en compte le remouillage (MacDonald J. D. et Kerekes R. J. 1995). Le modèle devient alors (Éq. I:2) :

$$\frac{m}{m_o} = \left[ 1 + \left( \frac{n \cdot m_o^n \cdot A \cdot I}{W^2} \right) \right]^{\frac{1}{n}} + \frac{R}{W} \quad \text{Équation I:2}$$

Ce modèle est validé expérimentalement (MacDonald J. D., Hamel J. & al. 2000). Néanmoins, il ne tient pas compte des caractéristiques du feutre. Ainsi si l'on considère un feutre différent, les paramètres doivent être réajustés (l'Anson S. et Ashworth T. 2000).

S'inspirant des travaux de Vomhoff (Vomhoff H., Martinez D. M. & al. 2000), l'Anson et Ashworth proposent alors de tenir compte de l'interface feuille-feutre (l'Anson S. et Ashworth T. 2000). Les auteurs présentent un modèle « differentiated permeability surface layer » (DPSL) où une zone de perméabilité beaucoup plus faible que le reste de la feuille de papier est créée par le pressage. Les caractéristiques de cette zone sont fonction des propriétés de la pâte, de la siccité dans la zone la plus déformée de la presse et de l'interface papier et feutre. Ce modèle permet de prédire la conséquence des changements de conditions de fabrication sur l'efficacité d'une presse de façon plus exacte que le modèle à perméabilité décroissante.

Les modèles unidimensionnels présentés précédemment ne considèrent pas les propriétés rhéologiques de la feuille et du feutre. D'autres modèles utilisant la description de Biot (Biot M. A. 1962) concernant les matériaux poreux, prédisent ainsi la déformation ou la distribution de contrainte durant le pressage. Ainsi, Mukhopadhyay et Kingsbury (Mukhopadhyay A. K. et Kingsbury H. B. 1980) retrouvent les résultats expérimentaux d'Asklöf (Asklöf C. A., Larsson K. O. & al. 1964), i.e. l'eau au centre de la pince s'écoule dans le sens inverse du sens de fonctionnement de la machine quelles que soient les conditions expérimentales. Cependant, cette modélisation a été faite en considérant pour le feutre et pour la feuille une perméabilité indépendante des déformations du milieu poreux. Un modèle similaire avec la prise en compte de la décroissance de la perméabilité en fonction de la contrainte structurale est présenté dans (Lewalle J., Singh K. M. & al. 1986). Ce modèle est encore affiné avec la considération de trois phases (air, eau, solide) (Gudehus T. 1988; Roux J. C. et Vincent J. P. 1991). Pour ces modèles, la décroissance de la perméabilité est décrite par la relation de Kozeny-Carman.

Avec l'ajout d'éléments chauffants sur les presses ou l'émergence du pressage à impulsion thermique, les modèles prennent alors en compte l'aspect thermodynamique. Les conditions d'écoulement étant différentes, les travaux effectués considèrent une relation entre pression hydraulique et vitesse de l'eau vérifiant la relation de Navier Stokes moyennée (Lindsay J. D. 1989) ou vérifiant la loi de Darcy (Martinez D. M. 1999). Une approche originale de ce problème est mise en place par Bloch (Bloch J.-F. 1995). Le problème est analysé à l'échelle microscopique pour être résolu à l'échelle macroscopique. Ce modèle est actuellement utilisé pour modéliser le pressage à impulsion thermique (Gustafsson J.-E. et Kaul V. 2000).

#### *2.3.d Conclusion.*

L'étude du pressage conduit à analyser les problèmes de consolidation, d'expression de l'eau et de remouillage. Les travaux exposés précédemment montrent que, si tous les mécanismes du pressage sont connus, l'évaluation quantitative de leurs effets sur le procédé de pressage ne peut être entreprise que si les caractéristiques des matériaux sont connues. En particulier, même si sa résistance à l'écoulement est beaucoup plus faible que celle du papier, le comportement du feutre pendant le pressage doit être connu quantitativement pour qu'une presse soit optimisée. En effet, la caractérisation du feutre peut améliorer l'expression de l'eau mais également la position des capacités alvéolaires du rouleau porteur ou améliorer son entretien.

### I.3 Le feutre.

Lors du pressage, un feutre est utilisé. Cet habillage est mis en place pour chaque pince. Il se présente sous la forme d'une boucle. La description de ce textile constitue l'objectif de ce paragraphe.

#### 3.1 Fonctions et propriétés.

Le paragraphe précédent (I.2) a montré que le feutre transporte et supporte la feuille humide, répartit la pression lors de son pressage, absorbe et draine l'eau. De plus, il entraîne les rouleaux non motorisés. Ces fonctions doivent être assurées avec la plus grande stabilité temporelle possible. Le feutre doit pour cela résister à l'encrassement, au compactage et à l'abrasion ainsi qu'aux agents chimiques utilisés pour la production du papier (Meadows D. G. et Shearin R. H. 1995). Les feutres pick-up et de première presse doivent avoir une perméabilité élevée afin d'assurer un drainage suffisant. Alors que pour les sections des presses suivantes la perméabilité est un facteur moins important. En effet, l'aspect remouillage constitue le principal paramètre limitant l'efficacité de la presse (Andreoulis N. 1982).

Le feutre ne doit pas perdre de fibres pouvant altérer la surface du papier. Ce type de problème arrive lors de malfaçon du feutre ou bien lorsque le conditionnement du feutre sur la machine n'est pas adapté. La figure I-14 montre les paramètres relatifs au feutre influençant l'objectif de production.

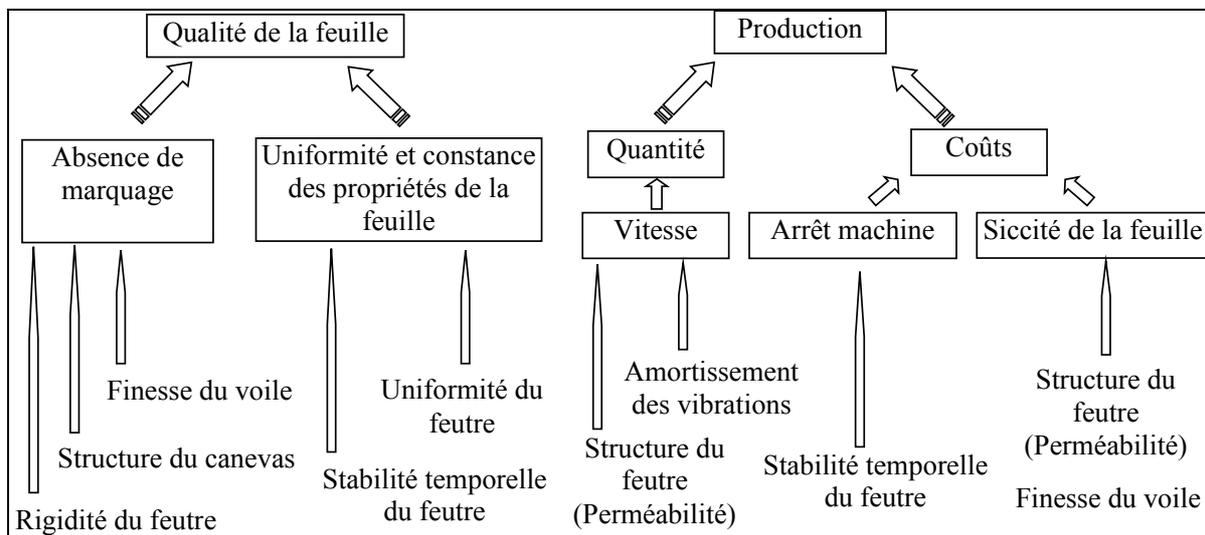


Figure I-14 : Influence du feutre sur la production.

### 3.2 Étapes de la vie d'un feutre.

Lorsqu'un feutre neuf est installé sur une presse, il ne fonctionne pas immédiatement de manière optimum. Lors de la période de rodage, le feutre se compacte pour atteindre une épaisseur et une perméabilité constantes. Durant cette période de rodage, l'efficacité de la presse peut être moindre. Cette déficience doit être compensée par un autre moyen comme par exemple : baisse de la vitesse de production, modification du pressage dans les autres pinces ou consommation d'énergie plus élevée en sécherie. Si la durée de conditionnement du feutre peut être diminuée par des traitements mécaniques (pré-compactage) ou chimiques (ajout d'un agent mouillant), elle ne peut être totalement supprimée. Après le rodage, le feutre débute sa phase de fonctionnement : la siccité est optimale, la feuille ne colle pas au feutre, il n'y a ni écrasé ni casse. Mais peu à peu, il s'encrasse et se compacte. Lorsque l'encrassement et le compactage sont trop importants, les propriétés du feutre sont tellement modifiées que la production ne peut être correcte (écrasé, cassé). La machine est alors arrêtée pour remplacer le feutre. Le changement d'un feutre peut être programmé en effectuant des relevés journaliers de l'efficacité de la section des presses (siccité, débit de l'eau exprimée, ...) (Fekete E. Z. 1998).

La section de presses est un élément à bien maîtriser dans une papeterie. Elle permet de réaliser des économies d'énergie mais elle peut aussi grever lourdement la production car toute la machine à papier est arrêtée à chaque changement de feutre. À titre d'exemple, une usine qui produit 200 000 t/an de papier journal, consomme environ 40 feutres par an (budget de 1 500 000 €) (Yeager R. 1997). Quatre-vingts heures environ par an d'arrêt sont imputées aux changements d'habillage de presse compte tenu que 2 heures sont nécessaires pour changer un feutre environ. Ces heures d'arrêt peuvent être planifiées et couplées avec d'autres entretiens de la machine à papier. Avec l'invention du feutre à jonction (seam felt), la durée d'un changement de feutre est nettement diminuée. Le feutre n'est plus une boucle mais une bande textile dont les extrémités sont reliées une fois l'installation sur la machine effectuée. Il n'y a ainsi plus de démontage de bâti de presse à opérer. De plus la conception de section de presses utilisant des feutres à jonction est beaucoup plus simple.

### 3.3 Historique et matières premières.

Jusque dans les années 50, les feutres sont réalisés à partir essentiellement de laine. Ce constituant a pratiquement disparu des feutres de papeterie depuis les années 1980. Il est remplacé par des fibres de polyamide ou de polyester. Un polyamide est obtenu par polymérisation d'une diamine avec un acide gras ou un monomère. Pour 90% des feutres fabriqués, le nylon ou parfois le grilon (appelé aussi perlon) sont utilisés (respectivement polyamide 6-6 et polyamide 6) (fig. I-15 et I-16). Ces matériaux ont un module d'Young de l'ordre de 2 GPa et une température de fusion autour de 220°C.

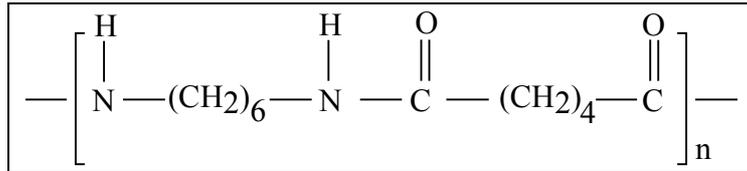


Figure I-15 : Formule chimique du Nylon 6-6.

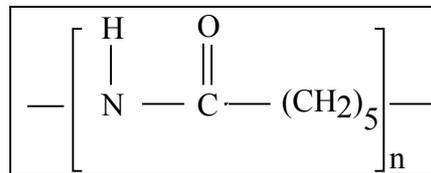


Figure I-16 : Formule chimique du Grilon.

Si, le polyester a une meilleure tenue aux acides que le polyamide, il reste peu utilisé car ses caractéristiques mécaniques sont moins bonnes que celles du polyamide.

Les fibres sont coupées à une longueur de 60 à 170 mm et la gamme de finesse s'étend de 3.3 à 44 décitex (masse en gramme pour une longueur 10 000 m). Ces fibres utilisées pour les voiles possèdent des degrés de matité différents. La matité (brillante, semi-mat, mat) reflète l'état de surface des fibres. Les fibres mates sont plus facilement manipulables car leur adhérence est accrue contrairement aux fibres brillantes plus lisses. Cependant la résistance mécanique des fibres brillantes est plus élevée. L'ondulation donnée aux fibres (courbure de la fibre) est très importante pour les propriétés rhéologiques du feutre notamment en compression. L'amélioration récente des fibres conduit à une surface de feutre plus régulière et plus résistante à l'abrasion (Rupp J. 1997).

Pour construire le canevas, différents fils sont utilisés: les fils filés, les fils multi-filaments, les fils mono-filaments, les mono-filaments retordus ou câblés (fig. I-17). Ils peuvent subir une enduction de résine pour leur apporter plus de rigidité. Les fils filés sont constitués de fibres courtes enchevêtrées. Les mono-filaments sont des fils continus en polyamide ou en polyester. Les fils multi-filaments sont constitués de fils continus (mono-filament) de petits diamètres enroulés les uns sur les autres. Les fils retordus sont constitués de mono-filaments de gros diamètres enroulés les uns sur les autres.

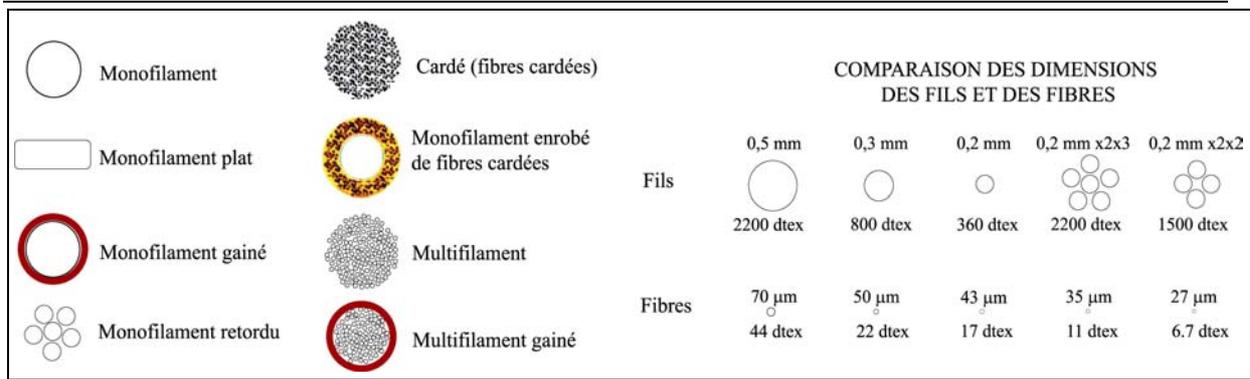


Figure I-17 : les principaux types de fils utilisés pour la fabrication de canevas

### 3.4 Construction du feutre.

Le feutre a une structure complexe. Il est constitué d'un canevas (toile tissée), sur lequel des voiles sont aiguilletés sur chacune de ses faces. Ces deux éléments sont décrits séparément, puis l'assemblage sera examiné.

#### 3.4.a Les différents canevas.

Le canevas est une structure tissée sur laquelle les fibres des voiles sont insérées. Son rôle est principalement de rigidifier le feutre afin de conserver une capacité alvéolaire lors de la compression. Pour son tissage, on distingue les fils de chaîne et les fils de trame (fig. I-18). Si souvent les fils de trame et de chaîne sont orthogonaux, les techniques modernes de tissage permettent des tissages plus complexes pour lesquels les directions des fils trame et chaîne forment un angle différent de  $90^\circ$  (Rodden G. 2000). Le canevas est caractérisé par les fils employés, l'espacement entre les fils de chaîne et l'espacement entre les fils de trame (duitage) et l'armature du tissu (schéma de tissage). Il existe une multitude de schémas de tissage possibles par exemple : tissu simple (fig. I-19), double, triple ou superposé. Pierce propose une approche géométrique pour la conception des canevas (Pierce F. T. 1947). De nos jours des codes existent pour construire et prédire les déformations de structure tissée (Toney M. M. 2000).

Une fois le feutre installé sur la presse, en général, les fils de trame se retrouvent dans le sens marche de la machine à papier, et les fils de chaîne dans le sens travers de la machine à papier. Des fils multi-filaments seront utilisés préférentiellement dans le sens marche de la machine à papier et des fils mono-filaments dans le sens travers.

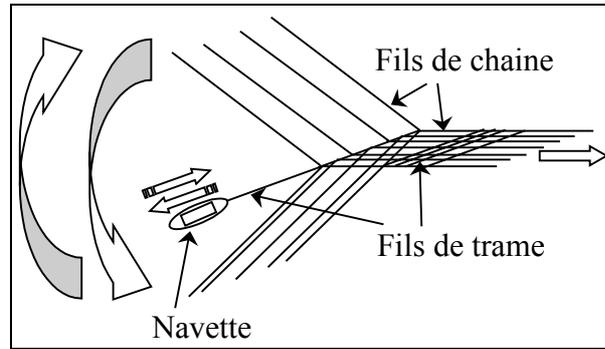


Figure I-18 : Tissage du canevas

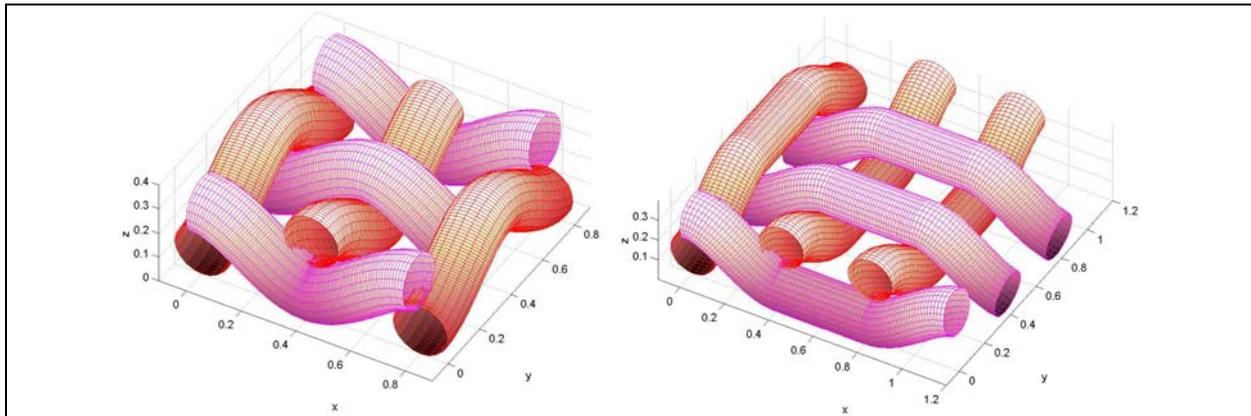


Figure I-19 : Exemple de tissage simple (reconstruction avec Matlab®)

### 3.4.b La nappe ou voile.

La longueur des fibres est souvent comprise entre 40 et 120 mm. Le diamètre est compris entre 25  $\mu\text{m}$  et 70  $\mu\text{m}$ . Le diamètre des fibres du voile influe sur la répartition de la contrainte structurale, la résistance à l'écoulement (Helle T. et Forseth T. 1994; Wheeldon J. B. et Hoyland R. B. 1979), le remouillage et l'encrassement du feutre. Ainsi, pour un même grammage de voile, plus les fibres sont fines moins le marquage de la feuille est prononcé. Cependant, plus le feutre s'encrasse vite et plus la résistance à l'écoulement est importante. Les fibres sont reçues sous forme de balles. Il faut alors générer une nappe la plus uniforme possible. Cette étape s'appelle le cardage (fig. n° I-20). Dans cette étape, les fibres peuvent être orientées. L'obtention d'un voile régulier et uniforme est le seul moyen de satisfaire la qualité de la production de papier demandé par le papetier. Les récents progrès dans les technologies de cardage ont nettement amélioré cet aspect (Strehlé P. et Döring R. 1997).

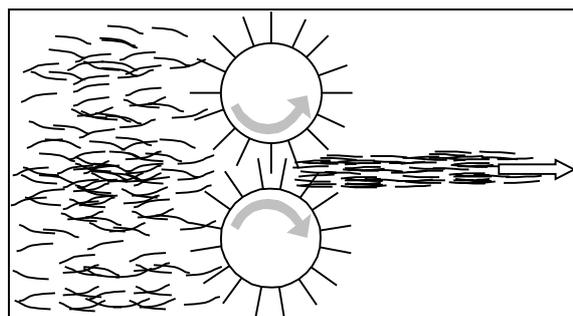


Figure I-20 : Schéma illustrant le cardage

### 3.4.c L'aiguilletage.

Après le cardage, le voile est lié au canevas. Les fibres du voile sont entraînées par des aiguilles dans la structure de la toile. Cette action est appelée aiguilletage. Elle joue un rôle prépondérant sur la structure et sur la cohésion du feutre. Les principaux paramètres de l'aiguilletage sont la forme des aiguilles (longueur et nombre de barbes), la profondeur de pénétration des aiguilles, le nombre d'aiguilles par unité de surface, le nombre de coups et parfois l'orientation des aiguilles par rapport au feutre (Vermeersch O. G. 1997). Les aiguilles (fig. I-21) peuvent avoir une ou plusieurs barbes. L'aiguilletage influence la surface et la structure du feutre, sa résistance mécanique (Wheeldon J. B. et Hoyland R. B. 1979) (fig. I-22) et la tenue des fibres de surface. Il confère au feutre une structure complexe dont les caractéristiques sont difficiles à prédire sans expérimentation. Toutefois, il est généralement considéré que les directions principales de fabrication sont aussi les directions principales des propriétés mécaniques et géométriques (en particulier le tenseur perméabilité).

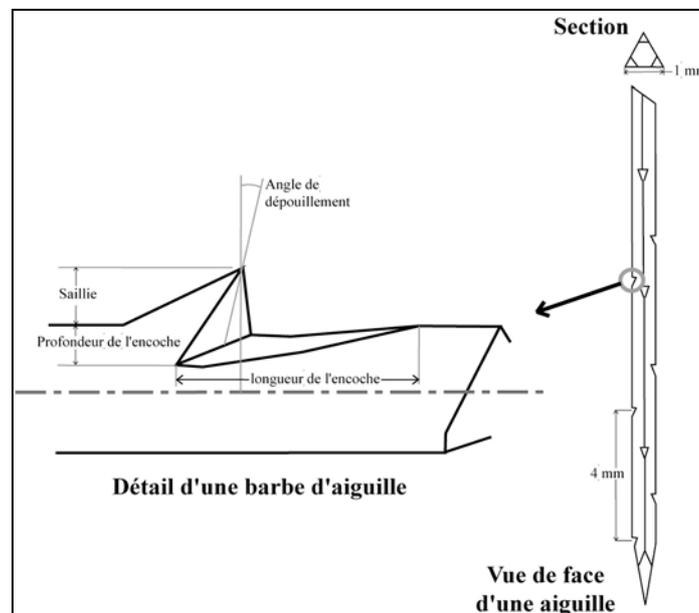
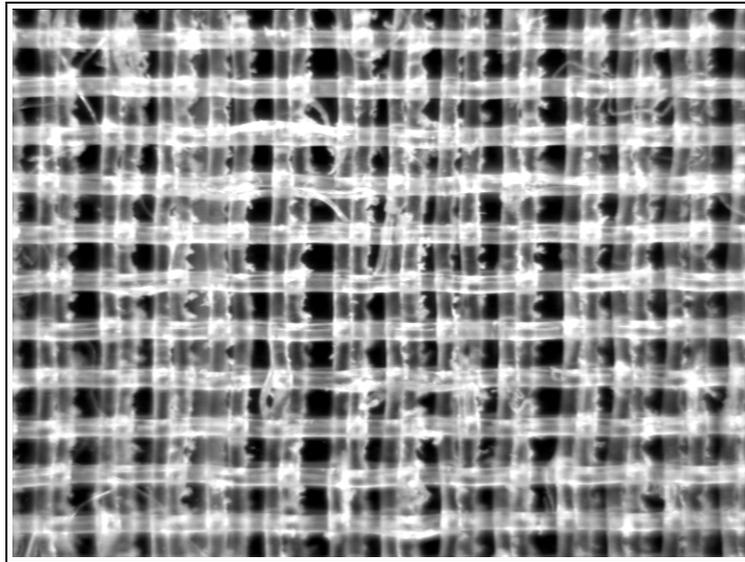


Figure I-21 : Exemple d'aiguille utilisée pour l'aiguilletage (Vermeersch O. G. 1997).



**Figure I-22 : Endommagement du canevas (armature double) par l'aiguilletage.  
Les voiles du feutre ont été enlevés.**

#### *3.4.d Les traitements thermiques ou chimiques.*

Avant et après aiguilletage le feutre tendu est introduit dans un four afin de stabiliser ses dimensions.

À l'aide de traitements chimiques adéquats, le feutrier peut modifier la mouillabilité, la souplesse, améliorer la résistance à l'abrasion et diminuer la perte des fibres ainsi que le marquage.

### **3.5 Les différents types de feutre.**

#### *3.5.a Les feutres aiguilletés à canevas souple (Batt On Base BOB).*

Le canevas est tissé de fils filés. Un ou plusieurs voiles sont aiguilletés sur cette base. En raison de la nature des fils utilisés qui s'écrasent un peu plus après chaque compression, le canevas se compacte considérablement augmentant ainsi fortement la résistance à l'écoulement du feutre. Du fait de sa compressibilité importante, un tel feutre peut être employé pour réduire les problèmes de vibration dans les dernières presses. Ainsi, il est aussi bien adapté pour les sections destinées à ne conduire qu'à de faibles gains de siccité, que pour des sections destinées à de forts égouttages lorsqu'une structure compressible est souhaitée.

#### *3.5.b Les feutres non tissés sans canevas (Non Woven Baseless).*

Les voiles supérieurs et inférieurs sont fortement aiguilletés l'un dans l'autre. Ces feutres se compactent beaucoup plus que les feutres avec canevas. De plus, leur porosité est plus faible. Cependant ils permettent une meilleure répartition de la pression, diminuant ainsi considérablement le marquage de la feuille. Ils sont utilisés dans des sections conduisant à de faibles égouttages pour lesquels les exigences concernant le phénomène de marquage et du fini de surface de la feuille sont importantes.

*3.5.c Les feutres aiguilletés à canevas rigide (Batt On Mesh : BOM).*

Le canevas est tissé avec des fils multi-filaments ou mono-filaments simples ou retordus. Ces fils peu déformables en compression apportent à la structure beaucoup plus de rigidité qu'un canevas tissé avec des fils filés. La stabilité dimensionnelle ainsi que la résistance à l'usure se trouve aussi améliorées. Du fait de la rigidité plus importante du canevas, la porosité diminue moins lors du pressage (évitant ainsi le risque d'écrasé), mais cela augmente les risques de marquage de la feuille. Ces feutres sont les plus répandus en papeterie.

*3.5.d Les feutres aiguilletés sans trame.*

Le canevas dans le feutre fini ne comporte que des fils de chaîne. La cohésion de l'ensemble est obtenue par aiguilletage intensif des voiles. L'avantage de ce feutre est qu'il s'encrasse moins vite et marque moins la feuille. Cependant, il ne peut être utilisé que pour de faibles pressions. De plus le canevas n'ayant aucune cohésion longitudinale, il est très difficile de superposer plusieurs voiles.

*3.5.e Les feutres aiguilletés à trame espacée.*

Les fils du canevas sont très espacés. Cette solution représente un compromis entre un feutre traditionnel à canevas rigide et un feutre sans trame. Les fils de chaîne étant maintenus, il est possible de superposer plusieurs canevas et plusieurs voiles ce qui n'est pas possible avec un feutre sans trame.

*3.5.f Les feutres aiguilletés sans croisement (crossless).*

Les fils de chaîne et de trame constituant le canevas du feutre ne sont pas entrelacés. Il n'existe pas de point de liaison entre les fils. Cette absence permet de réduire l'encrassement. Ce feutre est utilisé pour la fabrication de papiers contenant beaucoup de charges minérales.

*3.5.g Les feutres aiguilletés double ou triple canevas (laminated felt).*

Le feutre est composé de plusieurs canevas tissés indépendamment puis placés les uns sur les autres. La cohésion du feutre est alors obtenue par l'aiguilletage des voiles. Cette méthode améliore la flexibilité de conception des feutres. Cette technique existe depuis 1970. Le comportement de tels feutres est bien appréhendé par les feutriers (Banks R. 1994). Elle est proposée comme application possible dans la majorité des types de presse et de production seulement depuis quelques années. Ces feutres peuvent être conçus avec quatre ou cinq canevas superposés dans certaine section de presses (Meadows D. G. et Shearin R. H. 1995). La rigidité de l'armature permet au feutre de conserver une capacité alvéolaire plus importante que pour les feutres à simple canevas (Coulter T. E. 1994).

### *3.5.b Les nouveaux feutres.*

Les principales avancées sur le feutre concernent la diminution du remouillage et l'amélioration de la répartition de la contrainte structurale. Concernant le voile, l'inversion de la stratification, i.e. des fibres de voiles plus grosses du côté du papier et plus fines pour les sous-couches conduit à des résultats intéressants du point de vue du remouillage (Cottigny C. M. et Liu T. J. 1978). En effet, l'action des forces capillaires déplace l'eau de la surface vers l'intérieur du feutre. Par ailleurs, l'utilisation de fibres à section rectangulaire peut être plus intéressante que l'utilisation de fibres classiques à section circulaire pour la réalisation des voiles (Fekete E. Z. et Wiebe K. M. 1999). Concernant le canevas, le tissage hors axes ou multiaxial permet d'obtenir des directions de construction des canevas qui diffèrent du sens marche de la machine à papier (Rodden G. 2000; Vappula R., Tiikila J. & al. 1998). De nouvelles structures (Hawes J. 1999) sont mises au point pour augmenter la stabilité du feutre. Ces toiles plastiques perforées augmentent également l'uniformité de la répartition de la pression. Pour réduire le marquage, des feutres conçus sans canevas mais pourvus d'une membrane sont actuellement testés (Rodden G. 2000). Ils marquent moins la feuille et possèdent une porosité plus élevée. Un tel feutre est plus adapté aux vitesses élevées. La conception de presse à impulsion thermique nécessite la mise au point de feutre capable de résister aux actions mécaniques et chimiques habituelles mais aussi aux expositions à des températures élevées (Barlow S. K., Crouse J. W. & al. 1997).

### *3.5.i Sélection d'un feutre.*

Le choix d'un feutre n'est pas déterminé par le responsable de la production de la machine à papier mais par le feutrier lui-même car il possède plus de compétence et d'expérience dans ce domaine. La résistance à l'écoulement n'est pas un facteur important d'après Schiel et l'Anson (l'Anson S. et Ashworth T. 2000; Schiel C. 1969) car elle est beaucoup plus faible que la résistance à l'écoulement du papier lui-même. Cependant Helle (Helle T. et Forseth T. 1994) dans des travaux expérimentaux sur le pressage de papier de faible grammage montre l'influence de la structure du feutre et de la finesse du voile sur la fabrication du papier. De plus, Wheeldon J. B. (Wheeldon J. B. et Hoyland R. B. 1979), à travers deux exemples de section de presses, montre que le remplacement d'un feutre de type BOB par un feutre de type BOM améliore de manière très significative l'efficacité de la presse. Ainsi pour augmenter l'efficacité de la section de presses, changer de feutre peut être préférable à une augmentation de chargement sur les rouleaux.

L'aspect physico-chimique est très important pour décrire le vieillissement et l'encrassement du feutre. Ces caractéristiques peuvent devenir prédominantes, et ce fait, imposer le choix du matériau constituant les fibres et les fils du feutre.

#### **I.4 Conclusion.**

La rentabilité économique d'une machine à papier est en partie influencée par l'efficacité de sa section des presses. Depuis l'époque des presses pleines, la technologie du pressage a considérablement évolué améliorant notamment l'impulsion mécanique de pressage et l'expression de l'eau. Les méthodes avant-gardistes développées dans ce chapitre équipent une minorité de machine à papier. L'optimisation des presses existantes peut se faire en améliorant leurs habillages ainsi que le conditionnement de ces habillages. De plus avec l'apparition du pressage à très haute température, les problèmes innérents à cette nouvelle technologie ne pourront être résolus que si tous les paramètres du pressage et notamment la structure du feutre sont pris en compte (Bennett M. B. 1998; Gustafsson J.-E. et Kaul V. 2000). Les feutres ont tiré parti des avancées en matière de fibres textiles améliorant leur résistance et permettant ainsi d'obtenir des armatures plus complexes, des voiles plus réguliers.

Suivant les caractéristiques désirées de la feuille en sortie de machine, il est possible de trouver un feutre apportant une efficacité optimum de la section de presses. Pour cela il est nécessaire de bien maîtriser l'influence de la structure du feutre sur l'essorage, la consolidation de la feuille et sa surface. De plus, la stabilité temporelle du feutre doit, elle aussi, être prise en compte.

La recherche d'un feutre optimum nécessite donc l'étude de nombreux paramètres. L'aspect physico-chimique ne sera pas abordé compte tenu de la diversité des produits chimiques actifs entrant dans la production du papier. L'objectif de ce travail sera de déterminer l'influence de la structure du feutre sur le tenseur des perméabilités et de fournir une base de données renseignant sur l'évolution de la perméabilité lors du pressage afin d'améliorer les modèles de pressage existants.



## CHAPITRE II

# *CONCEPTION DU PERMÉAMÈTRE.*



## **Chapitre II : CONCEPTION DU PERMÉAMÈTRE.**

Nous avons vu dans le chapitre précédent, les mécanismes physiques responsables de l'expression de l'eau durant le pressage. Dans les cas où peu d'eau est exprimée, la résistance à l'écoulement a peu d'influence sur l'efficacité de la presse (Fekete E. Z. 1975). Toutefois, il est nécessaire d'étudier la structure du feutre pour déterminer quantitativement son influence sur le pressage du papier ou pour développer de nouvelles technologies.

Afin de modéliser les écoulements dans les sections de presse, la loi de Darcy est fréquemment utilisée sans justification. Avant d'étudier la résistance à l'écoulement des feutres, il est donc nécessaire de caractériser le régime d'écoulement existant dans celui-ci pour déterminer si la loi de Darcy est applicable à la modélisation du pressage moderne. Cette question est étudiée dans la première partie de ce chapitre.

Dans la deuxième partie, différentes méthodes de caractérisation de la résistance à l'écoulement sont présentées. Ayant choisi la méthode de mesure en fonction du cahier des charges, un perméamètre est conçu. Son fonctionnement sera vérifié avant de commencer les mesures de résistance à l'écoulement.

### **II.1 Définition générale de la résistance à l'écoulement.**

Durant l'extraction minière, l'infiltration d'eau (eau d'exhaure) dans les voies de passage est à la source d'accidents ou condamnations de l'accès à la mine. Dans le domaine pétrolier et gazétier ainsi que pour le captage d'eau, la connaissance de la résistance à l'écoulement du sous-sol permet de connaître la productivité d'un puit. Dans certaines applications de géomécanique et de médecine, les textiles utilisés doivent montrer une résistance à l'écoulement suffisante pour drainer les fluides en présence sans altérer les propriétés du milieu. Dans le domaine automobile, les filtres doivent offrir en permanence peu de résistance à l'écoulement tout en captant les particules indésirables. Il serait encore possible de donner de nombreux exemples où la propriété de résistance à l'écoulement est un facteur crucial. Divers domaines aussi bien industriels que scientifiques sont ainsi concernés par l'étude des milieux poreux. Le paragraphe suivant présente une méthode de classification de ces problèmes mettant en avant leur similitude.

### 1.1 Détermination du régime d'écoulement lors du pressage.

Dans le champ disciplinaire de l'hydraulique, lorsqu'un fluide s'écoule dans une conduite ou dans un canal, une perte de charge (dissipation d'énergie) se produit. Les travaux de Chézy (1810) ont montré la dépendance de cette dégradation d'énergie à la rhéologie du fluide et à la géométrie du volume contenant (et aussi d'éventuelles interactions physico-chimiques entre les composés en présence). Dans le cas d'un fluide vérifiant le modèle newtonien, la contrainte de cisaillement est proportionnelle au gradient de vitesse. La loi d'écoulement est alors définie par l'équation de Navier-Stokes (Éq. II:1) reliant le champ de contrainte au champ de vitesse. La notation d'Einstein est utilisée pour simplifier l'expression des équations faisant intervenir les composantes de tenseur ou de vecteur.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu\left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right] \quad \text{Équation II:1}$$

avec  $\sigma_{ij}$ , composante  $i,j$  du tenseur des contraintes,  
 $p$ , la pression hydrostatique,  
 $\delta_{ij}$ , symbole de Kronecker,  
 $\mu$ , viscosité de l'eau,  
 $u_i$ , composante  $i$  du vecteur vitesse.

Ce frottement visqueux est à l'origine de la perte d'énergie de la part du fluide. Si l'on considère maintenant un écoulement dans un milieu poreux, il est similaire à un écoulement dans des conduites tortueuses interconnectées. Ainsi la perte de charge engendrée par le matériau poreux dépend de la saturation (rapport du volume de fluide par le volume des pores du matériau), de la rhéologie du fluide et de la structure du milieu. La dégradation d'énergie est souvent estimée comme étant due uniquement au frottement visqueux du fluide aux parois (Comiti J. 1987).

Les écoulements de fluides peuvent être classés en comparant les termes prédominants de l'équation II:1. Pour notre étude, nous utiliserons uniquement le nombre de Reynolds qui compare les effets d'inertie aux effets visqueux.

Ce nombre est obtenu en effectuant le rapport du terme d'inertie et du terme visqueux de la loi de Navier-Stokes. En considérant l'écoulement stationnaire d'un fluide incompressible, il s'écrit :

$$\text{Re} = \frac{\rho V \Phi}{\mu} \quad \text{Équation II:2}$$

avec  $\rho$ , la masse volumique du fluide,  
 $V$ , la vitesse du fluide relativement aux parois du milieu poreux,  
 $\Phi$ , la dimension caractérisant le lieu de l'écoulement  
 $\mu$ , la viscosité cinématique du fluide.

Le nombre de Reynolds permet d'estimer l'importance des phénomènes non-linéaires dus à l'inertie. S'il est plus petit que l'unité alors le régime est qualifié de laminaire. S'il est supérieur à 2000, l'écoulement est dit turbulent. Entre ces deux valeurs, le régime est transitoire (laminaire vers turbulent). Ces bornes ne constituent pas des frontières précises mais seulement des repères pour l'étude de l'écoulement.

Dans le cas de l'expression de l'eau par pressage, plusieurs travaux dont (Chevallier P. 1988; Plaisted W. E., DeCrosta E. F. & al. 1980 ; Roux J. C. 1989 ) montrent que l'écoulement pendant le pressage est laminaire. Cependant depuis ces travaux, les vitesses de production ont considérablement augmenté, i.e. jusqu'à de 1 800 m.min<sup>-1</sup>. Par conséquent, le nombre de Reynolds doit être réévalué en utilisant des vitesses d'écoulement dans les structures poreuses plus contemporaines. La dimension caractérisant l'écoulement dans les pores peut être prise égale au diamètre hydraulique, rapport du volume alvéolaire par la surface pariétale des pores. La relation entre le diamètre hydraulique et la surface spécifique volumique est alors la suivante :

$$\Phi = \frac{4 \cdot \varepsilon}{S_v} \quad \text{Équation II:3}$$

avec :  $\varepsilon$ , la porosité,  
 $S_v$ , la surface spécifique volumique.

Dans la littérature (Chevallier P. 1988; Plaisted W. E., DeCrosta E. F. & al. 1980 ), les valeurs de vitesse filtrante,  $V_F$ , sont comprises entre 4 mm.s<sup>-1</sup> et 50 mm.s<sup>-1</sup> pour des vitesses de feuille allant jusqu'à 900 m.min<sup>-1</sup>. Un facteur multiplicateur de 2 peut être appliqué à la borne supérieure pour tenir compte des vitesses de production des machines à papier actuelles. L'encadrement de la vitesse filtrante devient alors :

$$4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq V_F \leq 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La vitesse moyenne  $v_m$  dans les pores est donnée par :

$$v_m = \frac{V_F}{\varepsilon} \quad \text{Équation II:4}$$

Le Reynolds devient alors :

$$Re = \frac{4 \cdot \rho \cdot V_F}{\mu \cdot S_v} \quad \text{Équation II:5}$$

La surface spécifique d'un feutre est de l'ordre de  $2 \cdot 10^4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . La viscosité de l'eau est de l'ordre de  $10^{-3} \text{ Pa.s.}$ , et la masse volumique de l'eau  $10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ . L'application numérique montre que le nombre de Reynolds est situé entre 0,8 et 20. D'après Scheiddeger (Scheiddeger A. E. 1974), la fin du régime laminaire se situe pour des nombres de Reynolds entre 0,1 et 75. L'inertie de l'écoulement microscopique peut faire apparaître des non-linéarités dans la relation d'écoulement macroscopique. Si l'on considère l'écoulement dans le papier, sa surface spécifique étant environ 100 fois supérieure à celle du feutre, le régime est, par conséquent, laminaire.

## 1.2 Choix de la loi d'écoulement.

Lorsque l'écoulement à travers un milieu poreux inerte est suffisamment lent, la relation la plus connue reliant le champ de pression hydraulique à la vitesse de filtration du fluide en écoulement est établie par Darcy en 1856 (Darcy H. P. G. 1856). La vitesse de filtration dans le milieu poreux est proportionnelle à la diminution de la perte de charge. Cette relation empirique est modifiée pour prendre en compte l'influence de la viscosité du fluide. Scheiddeger (Scheiddeger A. E. 1974) propose une généralisation de cette loi avec l'utilisation de la notation tensorielle. Il montre également que cette loi n'est valable que pour des écoulements caractérisés par un faible nombre de Reynolds ( $Re \ll 1$ ). Elle devient alors la loi de Darcy (Équation n°II:6) sous la forme utilisée aujourd'hui, où  $\underline{\mathbf{K}}$  est le tenseur des perméabilités,  $\mu$  la viscosité du fluide à la température T et P la pression du fluide.

$$\mathbf{v} = -\frac{\underline{\mathbf{K}}}{\mu(T)} \text{grad}(P) \quad \text{Équation II:6}$$

D'autres lois reliant perte de charge et débit existent et peuvent être utilisées en régime transitoire. Elles sont synthétisées dans la thèse de Comiti (Comiti J. 1987). Afin de modéliser un écoulement turbulent stationnaire caractérisé par un nombre de Reynolds grand ( $Re \gg 1$ ), l'équation de Forchheimer (Éq. II:7) est souvent employée :

$$-\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\mu}{K} \cdot V + \rho B \cdot V^2 \quad \text{Équation II:7}$$

avec :  $\rho$ , la masse volumique du fluide,

$V$ , la vitesse filtration.

$K$  est considéré comme ayant la même définition que dans la loi de Darcy.

Dans le cas d'écoulement non stationnaire, un terme supplémentaire est ajouté par Irmay (1959) :

$$-\frac{\Delta P}{\Delta L} = a \cdot V + b \cdot \rho V^2 + c \cdot \rho \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{Équation II:8}$$

La technique de l'homogénéisation (Auriault J.-L. 1987; Auriault J.-L. et Caillerie D. 1989) permet aussi d'obtenir des relations très intéressantes. Pour des écoulements plus rapides, la majorité des modèles empiriques font intervenir une dépendance avec le carré de la vitesse filtrante, alors que la loi obtenue par la technique d'homogénéisation fait intervenir de la vitesse de filtration au cube (Rasoloarijoana M. N. 1993) :

$$-\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\mu}{K} \cdot V + b \cdot \rho V^3 \quad \text{Équation II:9}$$

Lorsque le fluide interagit avec la matrice poreuse, la loi d'écoulement est alors couplée à une deuxième relation physique. Par exemple, lors d'interactions mécaniques, la structure se déforme. La loi d'écoulement est alors couplée à la rhéologie du matériau (Jönsson K. A.-S. et Jönsson B. T. L. 1992). Dans le cas d'interactions chimiques entre le fluide et le matériau, le problème est beaucoup plus complexe mais peut être dans certain cas modélisé (Carrayrou J., Mosé R. & al. 2002).

L'écoulement de l'eau à travers le feutre pendant le pressage est laminaire dans la plus part des pinces de section de presses. Par conséquent, notre démarche se limitera uniquement à caractériser la perméabilité définie par la loi de Darcy. Pour les pinces de presses où le régime de l'écoulement dans le feutre est transitoire, l'étude des écoulements dans le feutre, en régime laminaire, demeurerait intéressante pour l'optimisation des sections des presses. En effet, elle permettrait de comparer les différentes structures de feutres.

### 1.3 Synthèse bibliographique sur les études expérimentales de la résistance à l'écoulement.

La résistance à l'écoulement des milieux textiles fibreux est étudiée dans de nombreux domaines allant de la médecine au génie papetier. Différentes techniques de mesures sont utilisées. L'évaluation expérimentale de la résistance est faite avec un écoulement soit de gaz (généralement de l'air), soit de liquide (eau, huile...).

#### 1.3.a Techniques utilisant un gaz.

Habituellement, les feutriers caractérisent leur feutre avec un perméamètre de type Frazier (fig. II-1). Le textile placé au-dessus d'une ouverture circulaire est traversé par un écoulement d'air créé par une dépression constante (Chevallier P. 1992). La résistance à l'écoulement est alors reliée à la dépression, la section de l'ouverture, la viscosité de l'air et le débit.

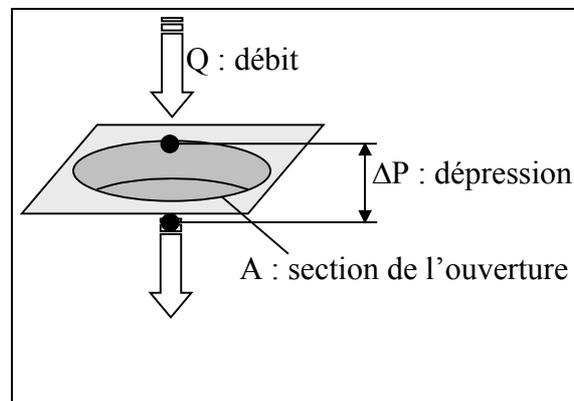


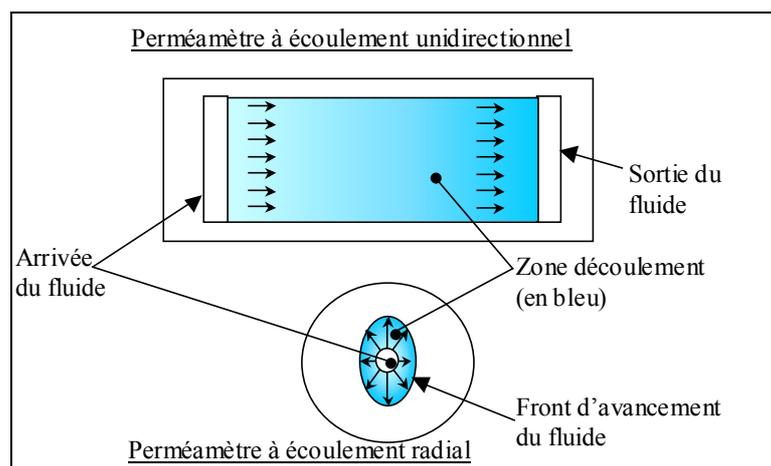
Figure II-1 : Schéma du fonctionnement d'un perméamètre de type Frazier.

Cette méthode a l'avantage de permettre des mesures rapides (en moins d'une minute). Cependant, plus le tissu est épais, plus les écoulements existants aux bords de l'ouverture influencent les résultats. Cette technique est améliorée en utilisant une cellule sans fuite latérale (Hagerty G. A., Walkinshaw J. W. & al. 1993). Une cellule similaire a été utilisée à l'occasion d'une étude sur l'influence de l'humidité de l'air sur la résistance à l'écoulement de tissus (Gibson P., Rivin D. & al. 1999). Les résultats de ces travaux montrent que la perméabilité de tissus fabriqués en nylon ou en polyester est insensible à l'humidité de l'air. En effet, microscopiquement, le nylon gonfle très peu en présence d'eau (environ 0,5%). Les mesures de résistance à l'écoulement à l'air sont fréquemment utilisées en papeterie pour prédire l'opportunité du changement d'un feutre (MacNamara S. J. 1964).

### 1.3.b Techniques radiale et unidirectionnelle utilisant de l'eau.

L'étude de la résistance à l'écoulement utilisant un liquide est souvent utilisée car elle permet facilement une exploration de tous les régimes d'écoulement avec des pressions de fluide plus importantes sans problème de compressibilité. Dans le domaine du moulage par injection, de nombreux travaux ont été réalisés afin de caractériser la résistance à l'écoulement de matelas fibreux. Les fibres employées possèdent des caractéristiques analogues aux fibres en polyamide utilisées dans la fabrication des feutres (elles sont imperméables et ont une rigidité similaire). Lors du processus de moulage par injection de résines armées en fibres, un milieu fibreux tissé ou non est placé dans un moule. Puis de la résine est injectée dans celui-ci.

Après polymérisation de la résine, un solide avec les formes désirées est obtenu. Le principal avantage de cette méthode de moulage est le coût relativement peu élevé de l'équipement et sa rapidité de production. Dans ce domaine industriel, de nombreuses études expérimentales ont été menées concernant la résistance à l'écoulement dans le plan d'un textile tissé ou non tissé afin de prédire le temps d'exécution d'un moulage ou améliorer la qualité. Ces travaux utilisent principalement des appareillages basés sur un écoulement radial ou unidirectionnel pour évaluer la résistance à l'écoulement (fig. II-2). Dans le premier cas, un fluide est injecté au centre d'un échantillon saturé ou bien non saturé, la progression du front est alors corrélée avec la pression d'injection. Dans le second cas, le fluide est canalisé et s'écoule dans une seule direction. La première méthode permet de déterminer les directions principales du tenseur des perméabilités plus facilement que la seconde.



**Figure II-2 : Schéma de fonctionnement des perméamètres à écoulement unidirectionnel ou radial.**

Plusieurs études (Gebart R. B. et Lidström P. 1996; Lekakou C., Johari M. A. K. & al. 1996; Lundström S. T., Gebart R. B. & al. 1999; Parnas R. S., Howard G. J. & al. 1995; Parnas R. S. et Salem A. J. 1993; Young W.-B. et Wu F. 1995) comparent les mesures de résistance à l'écoulement obtenues avec les deux méthodes pour des matériaux conçus avec de la fibre de verre dont les porosités sont supérieures à 40%.

Parnas (Parnas R. S. et Salem A. J. 1993), trouve que les résultats des deux méthodes de mesures sont très proches. Il teste des matériaux tissés contenant de la fibre de verre dont la porosité est comprise entre 45 et 80%. La perméabilité prend des valeurs allant de  $10^{-10}$  à  $10^{-12}$  m<sup>2</sup> et les rapports d'anisotropie de 1,1 à 1,65. Pour tous les matériaux testés, les directions principales des tenseurs des perméabilités ne sont pas celles correspondant à conception des textiles. Dans une seconde étude utilisant la méthode radiale pour déterminer les directions principales de la perméabilité, Parnas (Parnas R. S., Howard G. J. & al. 1995), mesure les directions principales d'une part d'une structure fibreuse non orientée et d'autre d'un tissage plus épais composé de deux fils superposés de chaîne (armure double).

Pour la structure aléatoire les résultats sont isotropes et indépendants du temps. Alors que pour la structure tissée l'anisotropie du tenseur perméabilité diminue au cours du temps et tend vers un rapport de 1,2. Les directions principales sont quant à elles les mêmes que celles de la structure. En étudiant le front de progression du fluide dans le textile, l'auteur montre expérimentalement, que la perméabilité mesurée avant la saturation complète de l'échantillon peut être jusqu'à plus de vingt fois supérieure à la perméabilité mesurée lorsque l'échantillon est totalement saturé. Cette différence importante est attribuée aux forces capillaires agissant sur le front de progression du fluide.

Au contraire Lekakou (Lekakou C., Johari M. A. K. & al. 1996) compare les résultats de mesures de perméabilité moyenne dans le plan obtenus avec la méthode radiale et les résultats obtenus avec la méthode unidirectionnelle. Les valeurs de perméabilité obtenues avec la méthode unidirectionnelle sont d'un ordre de grandeur supérieures aux résultats obtenus par l'autre méthode. Dans les deux cas, l'auteur trouve que la diminution de la perméabilité avec la variation de porosité vérifie la relation de Kozeny-Carman. Cependant, dans le cas de l'écoulement radial, si la progression du front est bien décrite par la loi de Darcy, la perméabilité dépend du débit de résine injectée ! Ces travaux vont dans le sens de ceux de Young (Young W.-B. et Wu F. 1995). Il étudie l'influence de la compression sur la perméabilité moyenne dans le plan avec la méthode de l'écoulement radial. La relation débit/pression est non-linéaire. Il attribue ce résultat aux déformations structurales importantes du matériau tissé. La relation perméabilité Darcéenne/porosité est assez bien décrite par une fonction exponentielle.

Gebart (Gebart R. B. et Lidström P. 1996) compare également les deux méthodes. Il montre qu'elles sont équivalentes. Néanmoins, la technique de l'écoulement radial est sujette à de grandes erreurs si le corps de l'appareillage n'est pas assez rigide. L'auteur propose un appareil conçu avec plusieurs cavités imposant un écoulement unidirectionnel dans des directions différentes améliorant ainsi la méthode unidirectionnelle (fig. II-3). Les résultats obtenus avec ce nouvel appareil montrent une excellente répétitivité (Lundström S. T.,

Gebart R. B. & al. 1999) et reproductibilité (Lundström T. S., Stenberg R. & al. 2000) avec des textiles tissés ou non en fibres de verre. La reproductibilité est limitée par les variations ‘naturelles’ du matériau.

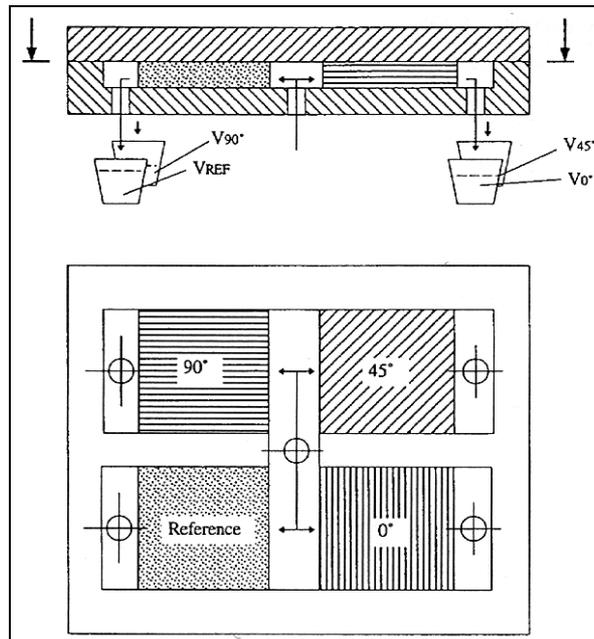


Figure II-3 : Perméamètre de Lundström et Gebart.

Lundström remarque que l'anisotropie de la perméabilité longitudinale de textiles non-tissés augmente quand la porosité diminue. Dans ces travaux, la porosité varie de 70 à 50%, la perméabilité de 150 à 17  $\mu\text{m}^2$  et l'anisotropie de la perméabilité varie de 1 à 10. L'auteur trouve de petites différences dans les résultats de perméabilité quand l'écoulement est saturé ou non. Il montre que l'incertitude sur la mesure de perméabilité augmente lorsque l'anisotropie de la perméabilité croît.

La méthode radiale peut être aussi utilisée pour caractériser localement la perméabilité (Montgomery S. M., Miller B. & al. 1992). Il est alors possible d'étudier la distribution de perméabilité. Généralement, plus le grammage d'une nappe de fibres est faible, plus la dispersion est importante dans la distribution massique des fibres. L'étude de la perméabilité locale est alors cohérente avec cette observation car elle révèle que la dispersion de perméabilité est plus élevée dans le cas des nappes d'épaisseur faible.

Des méthodes originales permettant de déterminer l'orientation de la perméabilité dans le plan d'une nappe de fibres utilisent des fibres optiques (Ahn S. H., Lee W. I. & al. 1995) ou des capteurs thermiques (Weitzenböck J. R., Shenoï R. A. & al. 1998). Les fibres optiques ou les capteurs thermiques sont placés dans la nappe de fibres à étudier. Dans les deux cas, les signaux transmis sont alors fonction de l'avancée du front du fluide et ne nécessitent plus de visualisation directe. Cette technique permet alors d'employer des matériaux plus rigides pour la conception de perméamètre radial.

*1.3.c Technique transversale utilisant de l'eau.*

Concernant la perméabilité transversale, la méthode décrite est identique depuis celle mise au point par Darcy (Bates P. J., Taylor D. & al. 2000). Une différence de pression est maintenue constante sur chacune des faces du tissu déformé pendant que le débit de fluide traversant le matériau est mesuré. Cette technique est employée dans quelques travaux centrés sur l'optimisation du pressage, soit en vue de la caractérisation et de l'amélioration du feutre soit pour l'étude in-situ de l'évolution de la perméabilité au cours de la production. Dans ce dernier cas, ces travaux ont abouti à la conception d'une buse qui, placée sur le feutre, souffle un jet d'eau à pression constante. L'évolution du débit reflète alors l'évolution de la perméabilité du feutre au cours de la production. Un tel suivi permet alors d'anticiper un changement de feutre ou de vérifier l'impact d'un changement de production ou d'adjuvant sur le feutre et l'influence du nettoyage du feutre (Pikulik I. I., Gilbert D. & al. 1991; Publicité 1997).

*1.3.d Travaux expérimentaux relatifs au feutre.*

Nous terminerons cette partie par la synthèse des études expérimentales portant sur la perméabilité des feutres de presses. Avec l'évolution des fibres textiles et des techniques de construction, il est nécessaire de caractériser les nouveaux feutres. Ainsi l'étude de la perméabilité des feutres est un sujet réapparaissant à chaque amélioration technique. Les travaux les plus anciens sur les feutres sont faits par Nissan (Nissan A. H. 1954). Mais les premières études du tenseur perméabilité sont menées par Macklem (Macklem J. E. 1961). Il étudie l'influence de la compression sur la perméabilité. Les perméabilités sont comprises entre  $35 \mu\text{m}^2$  et  $0,2 \mu\text{m}^2$  pour des porosités allant de 0,7 à 0,3, obtenues pour des contraintes allant de 0 à 6,9 MPa. La diminution de la perméabilité du feutre en compression est assez bien modélisée par la loi de Kozeny-Carman (cf. chap. III). Kershaw (Kershaw T. N. 1972) réactualise l'étude précédente avec des feutres alliant des fibres synthétiques et de la laine. La gamme de perméabilité est alors entre  $50 \mu\text{m}^2$  et  $5 \mu\text{m}^2$  pour des contraintes structurales allant de 0,3 à 2,4 MPa (porosité située entre 0,8 et 0,6). Ballard (Ballard J. 1986) et Chevallier (Chevallier P. 1988) ont complété ces travaux par la prise en compte de la tension du feutre. La perméabilité de ces feutres constitués uniquement de fibres synthétiques, s'étend alors de  $70 \mu\text{m}^2$  à  $2 \mu\text{m}^2$  pour des compressions de 0 à 3 MPa et des tensions de 0 à  $450 \text{ daN}\cdot\text{m}^{-1}$ .

Afin de contrôler la perméabilité des feutres pendant leur utilisation, un appareil de mesure en ligne est commercialisé par la société Lorentzen & Wettre (Pikulik I. I., Gilbert D. & al. 1991), (Kånge L.-H. T. 1995). Une buse souffle un jet d'eau à travers le feutre à pression constante et enregistre le débit. Son utilisation permet non seulement d'indiquer l'opportunité d'un changement de feutre mais aussi d'optimiser le nettoyage du feutre.

#### **1.4 Conclusion.**

Cette partie présente la synthèse de travaux sur la résistance à l'écoulement dans les milieux fibreux. Il a été montré que, la loi de Darcy est applicable à la description de l'écoulement dans la pince d'une section de presses de machine à papier. La synthèse bibliographique a fourni tous les éléments qui permettront de concevoir un appareil expérimental destiné à mesurer la perméabilité transversale et longitudinale de milieux fibreux.

## **II.2 Conception du perméamètre.**

### **2.1 Cahier des charges.**

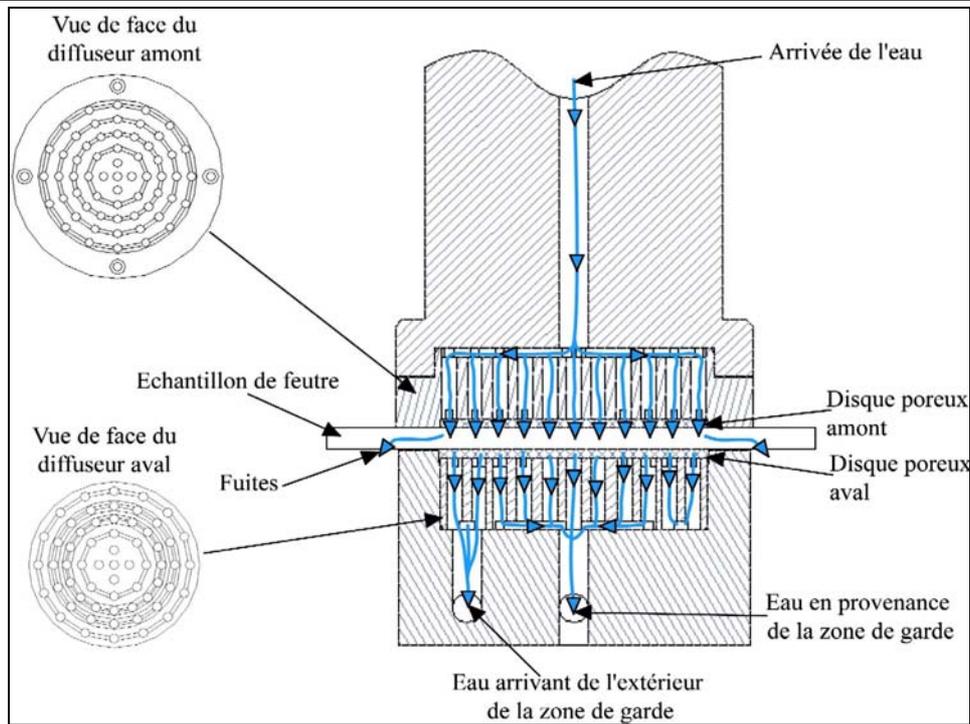
Ce travail s'insère dans le cadre du projet Joule III (JOECT92). La tâche associée à cette thèse est de fournir des valeurs de perméabilité transversale et longitudinale de feutre de papeterie pour différents niveaux de compression. Ainsi, l'appareil doit imposer un écoulement perpendiculaire au plan du matériau alors qu'une compression lui est imposée. Lors du fonctionnement de la presse, le feutre est tendu pour entraîner les rouleaux non motorisés. L'influence de la déformation due à la tension est donc nécessaire pour compléter l'étude. Pour ne pas perturber les déformations de la tension et de la compression, aucune contrainte supplémentaire ne doit exister, en particulier aucune contrainte parasite induite par la création d'étanchéité dans le plan du feutre. L'appareil doit être facile d'utilisation avec une mise en place simple et rapide de l'échantillon saturé en eau. Le régime d'écoulement doit correspondre à celui existant dans les pinces de presses à papier.

### **2.2 Conception des cellules.**

Les méthodes radiales et unidirectionnelles utilisées pour les mesures de perméabilité dans le plan sont équivalentes (paragraphe II.1.3). Cependant, dans le cas de la technique radiale, les conditions expérimentales doivent être soigneusement contrôlées au cours de l'essai en particulier les déformations de l'appareillage. De ce point de vue, la méthode utilisant un écoulement radial semble la plus difficile à mettre en oeuvre dans le cadre de notre étude. Il faudrait d'une part, obtenir la compression uniforme du feutre pour des contraintes relativement élevées, et d'autre part, visualiser l'écoulement dans celui-ci. Un écoulement unidirectionnel semble plus adapté pour nos mesures de résistance à l'écoulement, car cette méthode permet une évaluation plus précise de la perméabilité dans une direction.

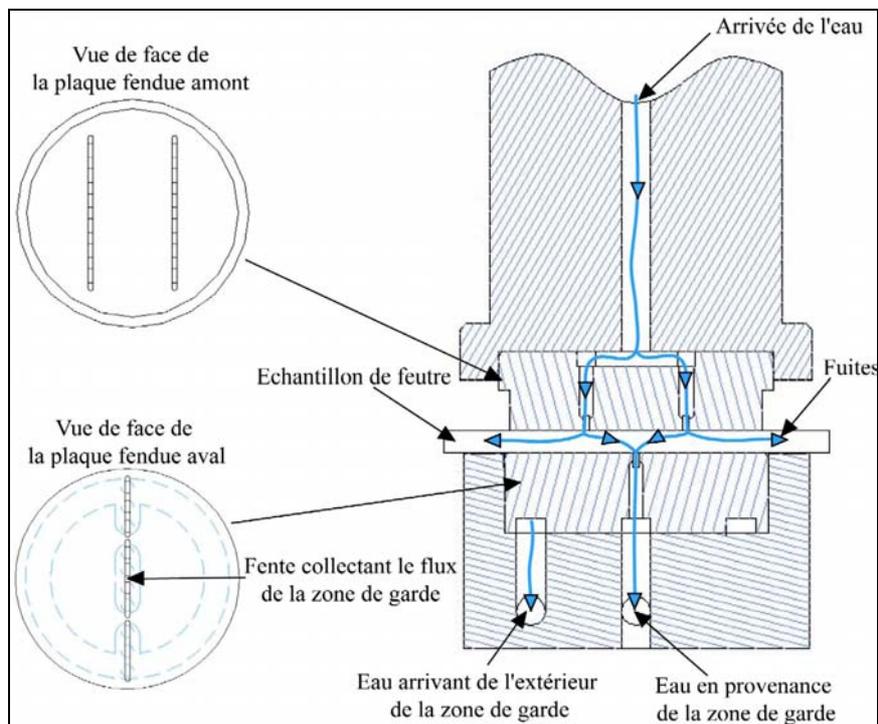
L'appareil doit pouvoir mesurer la perméabilité à la fois dans la direction de l'épaisseur ainsi que dans une direction quelconque du plan du feutre. Ainsi, une cellule amovible est dédiée aux mesures de la perméabilité transversale. Une seconde a été conçue pour la mesure de la perméabilité longitudinale.

La figure II-4 illustre le principe de fonctionnement de la cellule transversale. Pour les mesures de perméabilité transversale, des disques poreux sont placés de part et d'autre l'échantillon de feutre. Ils sont utilisés pour répartir le plus uniformément possible l'écoulement ainsi que la contrainte structurale. Ces disques sont fixés sur des diffuseurs décrits précisément en annexe A, figure A-4 et A-5.



**Figure II-4 : Illustration du fonctionnement de la cellule du perméamètre transversale. L'eau traverse successivement le diffuseur amont, le disque poreux amont, le feutre, le disque poreux aval, et enfin, le diffuseur aval.**

Pour les mesures de perméabilité longitudinale, l'écoulement dans le plan du feutre est imposé au moyen de trois fentes parallèles (cf. fig. II-5 et annexe A fig. A-7 et A-8). La pression hydraulique est plus élevée dans les fentes externes que dans la fente centrale. La cellule impose ainsi un écoulement unidirectionnel dans le feutre des fentes externes vers la fente centrale.



**Figure II-5 : Illustration du fonctionnement de la cellule du perméamètre longitudinale. L'eau traverse successivement la plaque fendue amont, le feutre, et enfin, la plaque fendue aval.**

Comme aucune étanchéité n'est imposée, un écoulement vers l'extérieur de la cellule peut exister. Pour tenir compte uniquement de l'écoulement non influencé par les conditions extérieures, une zone de garde est utilisée. L'eau s'écoulant dans la zone de garde entre en compte dans les mesures, l'eau s'écoulant à l'extérieur non. Dans le cas où cette technique serait inefficace, une membrane élastique permet de fermer la cellule lorsque l'on teste des échantillons circulaires.

Lors de la compression du feutre, le parallélisme entre les faces doit être respecté pour obtenir une déformation uniforme. Cette fonction est réalisée par le guidage entre le piston presseur et le bâti du perméamètre. L'épaisseur d'un feutre est de 4 à 6 mm. L'ouverture maximale de la cellule est de 12 mm. Il est ainsi possible de placer deux échantillons superposés pour vérifier que la mesure est bien intrinsèque au matériau testé.

### *2.2.a Dimensionnement.*

La presse utilisée pour les travaux expérimentaux peut fournir un effort de 60 kN. Le vérin pneumatique souple dont elle est pourvue, autorise que la surface d'application ne soit pas orthogonale à l'axe de la presse avec un débattement angulaire de  $5^\circ$  (fig. II-6). Un détendeur est utilisé pour réguler la pression pneumatique dans le vérin. Un capteur de force permet de connaître l'effort développé par le vérin. L'effort développé pour une pression pneumatique donnée dans le vérin étant toujours le même (cf. figure II-7), seule la pression dans le vérin sera mesurée pendant les mesures de perméabilité. La pression dans la cellule est calculée à partir de la régression linéaire obtenue après l'étalonnage (cf. figure II-7).

Si le régime de l'écoulement dans le feutre est transitoire lors du pressage, l'étude des écoulements dans le feutre, en régime laminaire, demeurerait intéressante pour l'optimisation des sections des presses. En effet, elle permettrait de comparer les différentes structures de feutres.

Afin d'atteindre des niveaux de déformation identiques à ceux atteints lors du pressage, la section de la cellule est tout d'abord calculée. La force maximale développée par le vérin pneumatique de la presse est de 60 kN. L'ordre de grandeur de la contrainte de compression caractérisant le pressage est de 5 MPa. Ainsi une cellule d'un diamètre de 120 mm permet d'atteindre cette contrainte pour le chargement maximum.

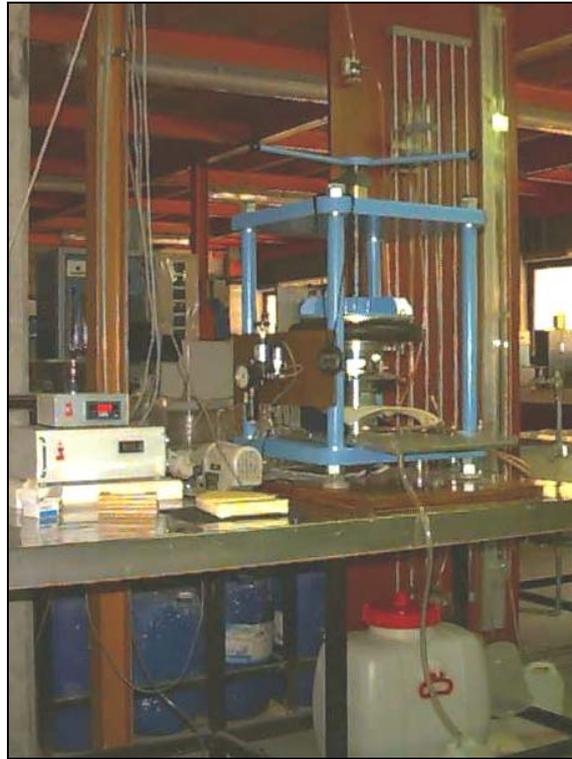


Figure II-6 : Photographie de l'appareil et de la presse

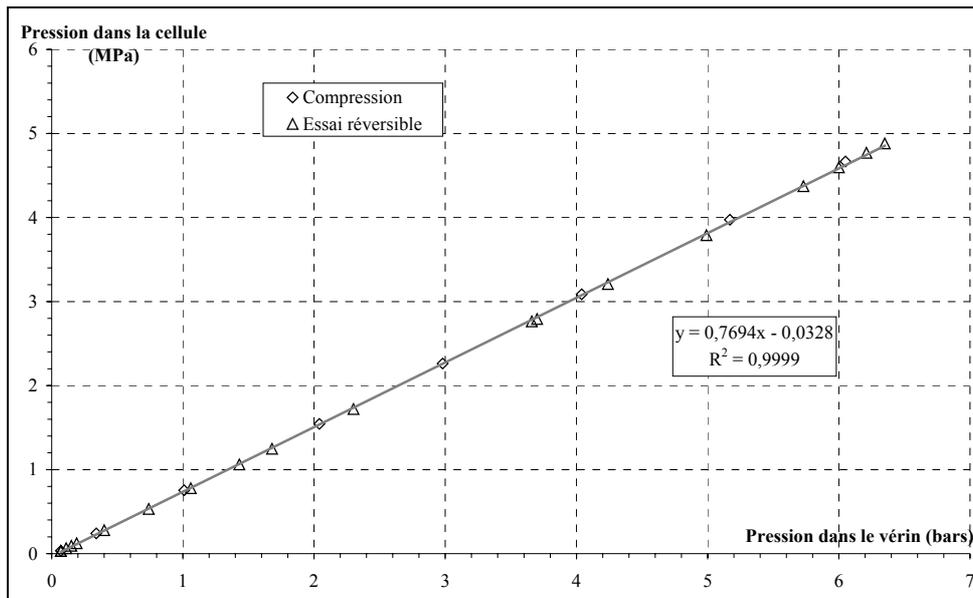
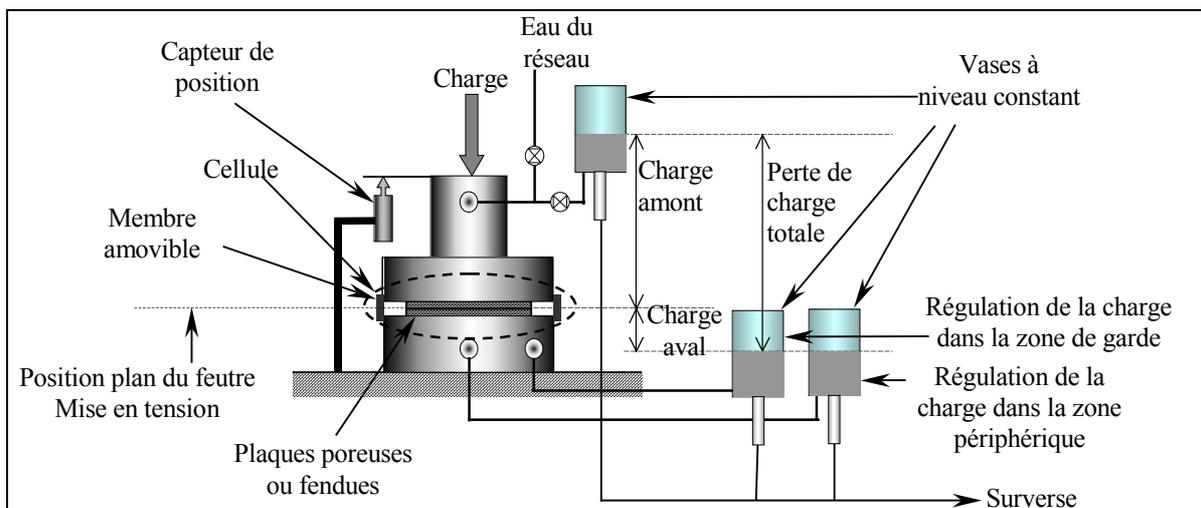


Figure II-7 : Courbe d'étalonnage du vérin pneumatique utilisé pour comprimer le perméamètre.

La régulation de la pression hydraulique est réalisée par des vases à niveau constant (fig. II-8). Un vase est placé à l'amont de l'appareil, et deux autres sont placés à l'aval à la même altitude. La perte de charge maximum est alors limitée par la hauteur de plafond de la salle (elle est de 2 m environ (20 kPa)). Les trois vases sont en polyéthylène transparent. Chacun est fixé sur deux douilles à billes coulissant sur des rails parallèles permettant ainsi un réglage rapide et précis de leur altitude. Les valeurs des altitudes amont et aval sont lues sur une règle verticale graduée ce qui permet une précision de 2 mm (20 Pa) sur la différence de pression. La différence de ces deux mesures est alors interprétée directement comme une perte de charge. Il est possible d'atteindre des différences de pression plus importantes en se connectant directement sur le réseau d'eau courante (fig. II-8).



**Figure II-8 : Schéma simplifié du perméamètre et de son équipement.**

Pour déterminer la taille de la zone influencée par les conditions extérieures, les cellules pour l'écoulement transversale et longitudinale ont été modélisées avec le logiciel Matlab<sup>®</sup> (fig. II-9 à II-12). Pour la modélisation de la cellule transversale, le problème est supposé axisymétrique. L'écoulement est alors calculé sur une demi-section de la cellule. Les trous des diffuseurs (annexe A, fig. A-4 et A-5) sont remplacés par des rainures de 3 mm de large (fig. II-9 et II-10). La perméabilité des plaques poreuses est isotrope et est de  $100 \mu\text{m}^2$  d'après les documents fournis par le fabricant. La perméabilité du feutre est dans la direction verticale de  $1 \mu\text{m}^2$  et, dans la direction horizontale de  $10 \mu\text{m}^2$ . Afin de dimensionner la zone de garde, les simulations de l'écoulement sont effectuées pour les pertes de charge maximale et minimale, i.e. respectivement 2mCE (mètre de colonne d'eau à la pression atmosphérique) et 20cmCE. Les autres conditions aux limites sont indiquées sur les figures illustrant les résultats de calculs.

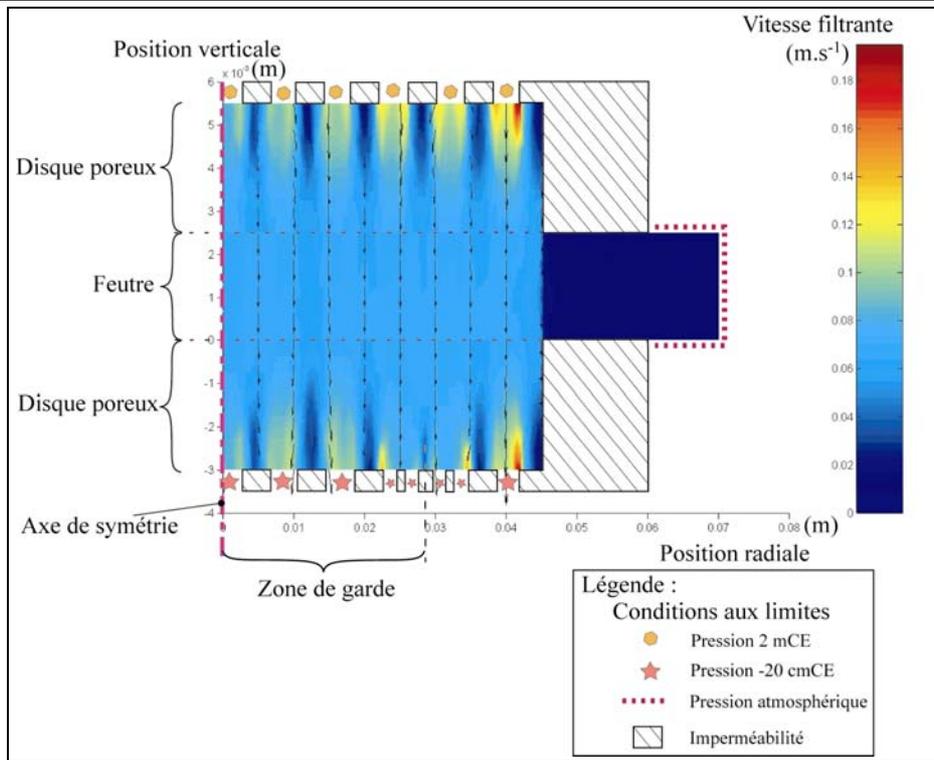


Figure II-9 : Simulation de l'écoulement dans la cellule dédiée à la perméabilité transversale, Cas de la perte de charge maximale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches.

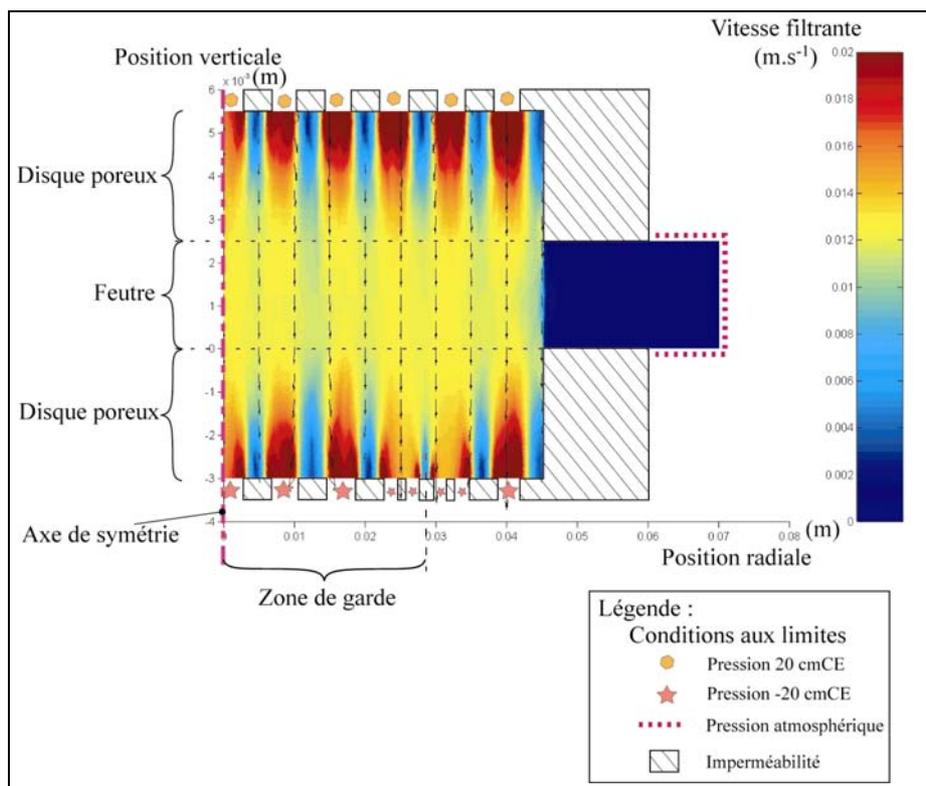
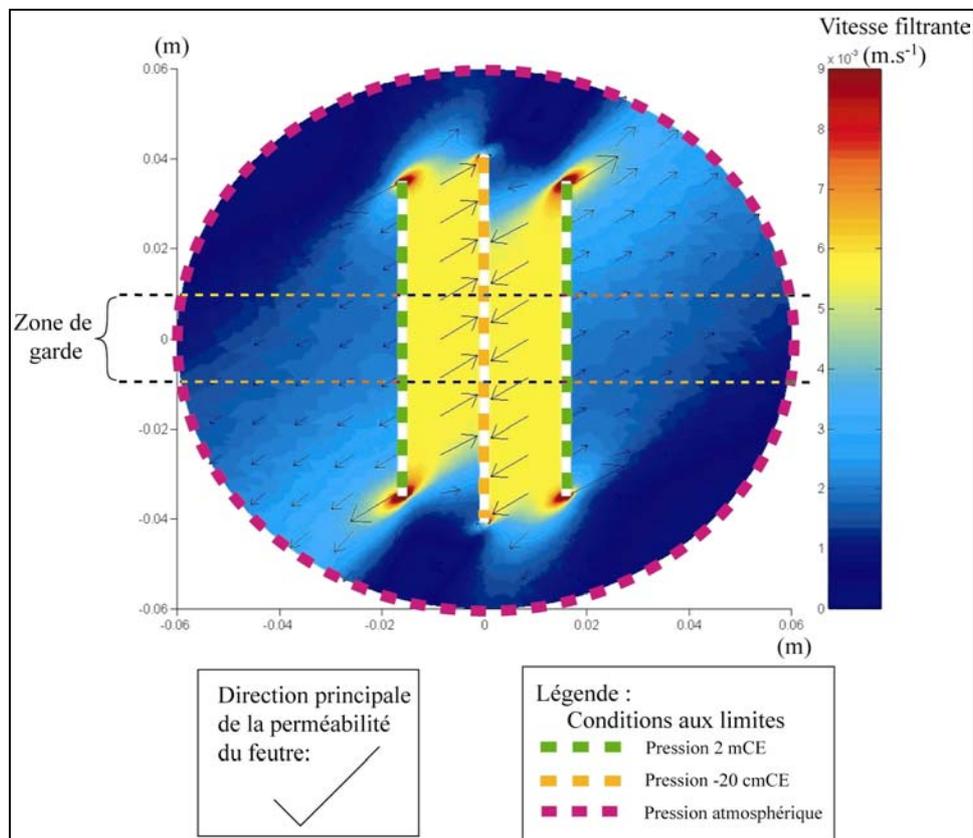


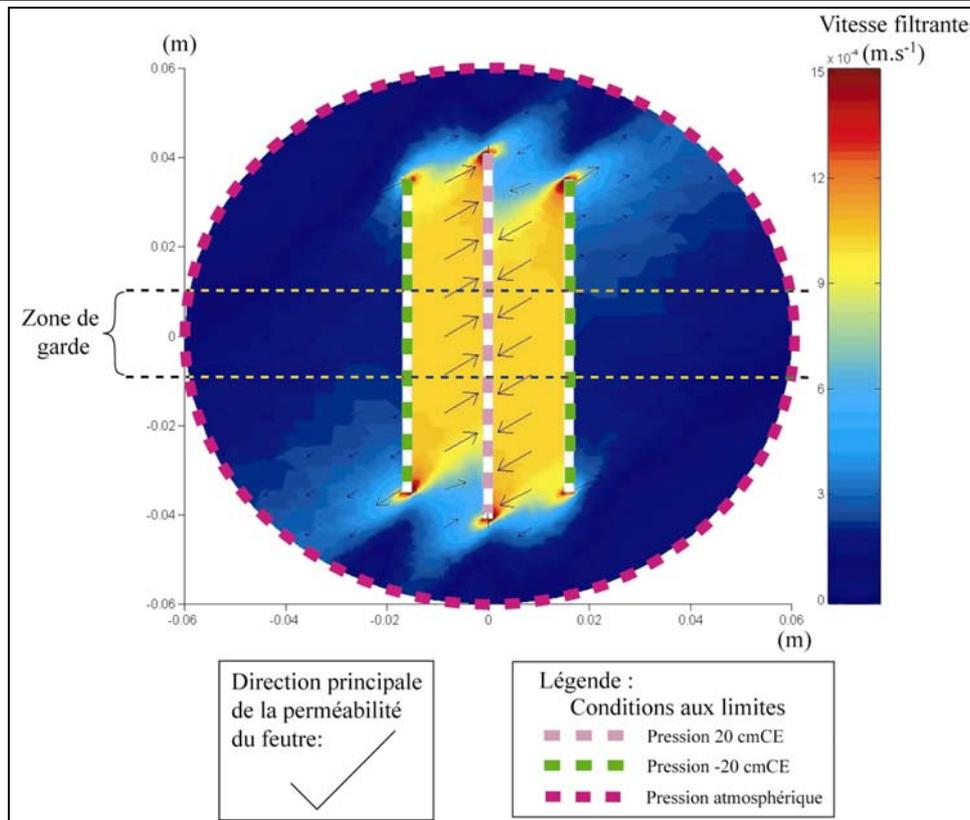
Figure II-10 : Simulation de l'écoulement dans la cellule dédiée à la perméabilité transversale, Cas de la perte de charge minimale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches.

Les résultats de ces simulations montrent que l'écoulement dans la partie centrale du feutre, nommée zone de garde, (fig. II-9 et 10) n'est pas influencé par les conditions latérales. Le diamètre de cette zone est alors dimensionné à 57 mm. La vitesse filtrante dans la zone de garde est comprise entre  $0,012 \text{ m.s}^{-1}$  et  $0,06 \text{ m.s}^{-1}$  lorsque la pression amont varie de 2 mCE à 20 cmCE (20 kPa à 0,2 kPa). En reprenant le calcul de nombre de Reynolds présenté dans le paragraphe I.1.1, ces vitesses sont cohérentes avec l'hypothèse de régime laminaire.

Pour la modélisation de la cellule dédiée aux mesures de perméabilité dans le plan du feutre, le problème numérique à résoudre est considéré comme un problème plan. Les directions principales du tenseur des perméabilités sont indiquées sur les graphiques illustrant les résultats des modélisations. Les valeurs de perméabilités dans les directions principales sont  $1 \mu\text{m}^2$  et  $5 \mu\text{m}^2$ . Les conditions aux limites correspondent aux pertes de charges maximale et minimale, i.e. simulations avec des pressions en amont de 2 mCE et de 20 cmCE. Elles sont indiquées sur les figures II-11 et II-12.



**Figure II-11 : Simulation de l'écoulement dans la cellule dédiée à la perméabilité longitudinale, Cas de la perte de charge minimale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches.**



**Figure II-12 : Simulation de l'écoulement dans la cellule dédiée à la perméabilité longitudinale, Cas de la perte de charge minimale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches.**

Les résultats des simulations des écoulements longitudinaux montrent que la vitesse filtrante dans le feutre est comprise entre  $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$  et  $10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$  lorsque la pression amont varie de 2 mCE à 20 cmCE. La largeur de la zone de garde est dimensionnée à 30 mm comme indiquée sur les figures II-9 et II-10. Dans la seconde simulation (fig. II-12), au niveau des extrémités de la fente centrale, un risque d'aspiration d'air est mis en évidence par une zone, reliant la fente centrale à l'extérieur, où la pression est inférieure à la pression extérieure. Comme pour les simulations précédentes, les hypothèses émises sur le régime de l'écoulement sont bien vérifiées.

Le débit maximum pour une pression amont de 2 mCE dans la zone de garde est calculé en utilisant les résultats précédents de simulations. Il est alors de  $9 \text{ L.min}^{-1}$  pour le perméamètre transversal et de  $4 \text{ cL.min}^{-1}$  pour le perméamètre longitudinal.

Les débits pouvant devenir très faibles en particulier lorsque le feutre est très comprimé, le moyen choisi pour mesurer le débit est la pesée et le chronométrage. La contrainte maximum imposable par la presse utilisée est de 5 MPa ce qui correspond au niveau de contrainte existante dans une section de presses réelle (cf. fig. I-12). Sur une machine à papier, le feutre peut être tendu jusqu'à une contrainte de l'ordre de  $700 \text{ daN.m}^{-1}$ . Un cadre de mise en tension permet de tendre le feutre jusqu'à  $1200 \text{ daN.m}^{-1}$ . Ce cadre est composé d'un bâti rigide sur lequel est fixé un vérin pneumatique. La tension est imposée au feutre par l'intermédiaire de deux mâchoires.

2.2.b Fabrication.

Le plan d'ensemble de l'appareil est présenté figure II-13 et la photographie de l'équipement figure II-14. Les plans des pièces utilisées dans les cellules sont présentés en annexe A. Tous les éléments du perméamètre sont réalisés en acier inoxydable, exceptés les deux montants du bâti. Ces derniers sont fabriqués en aluminium anodisé.

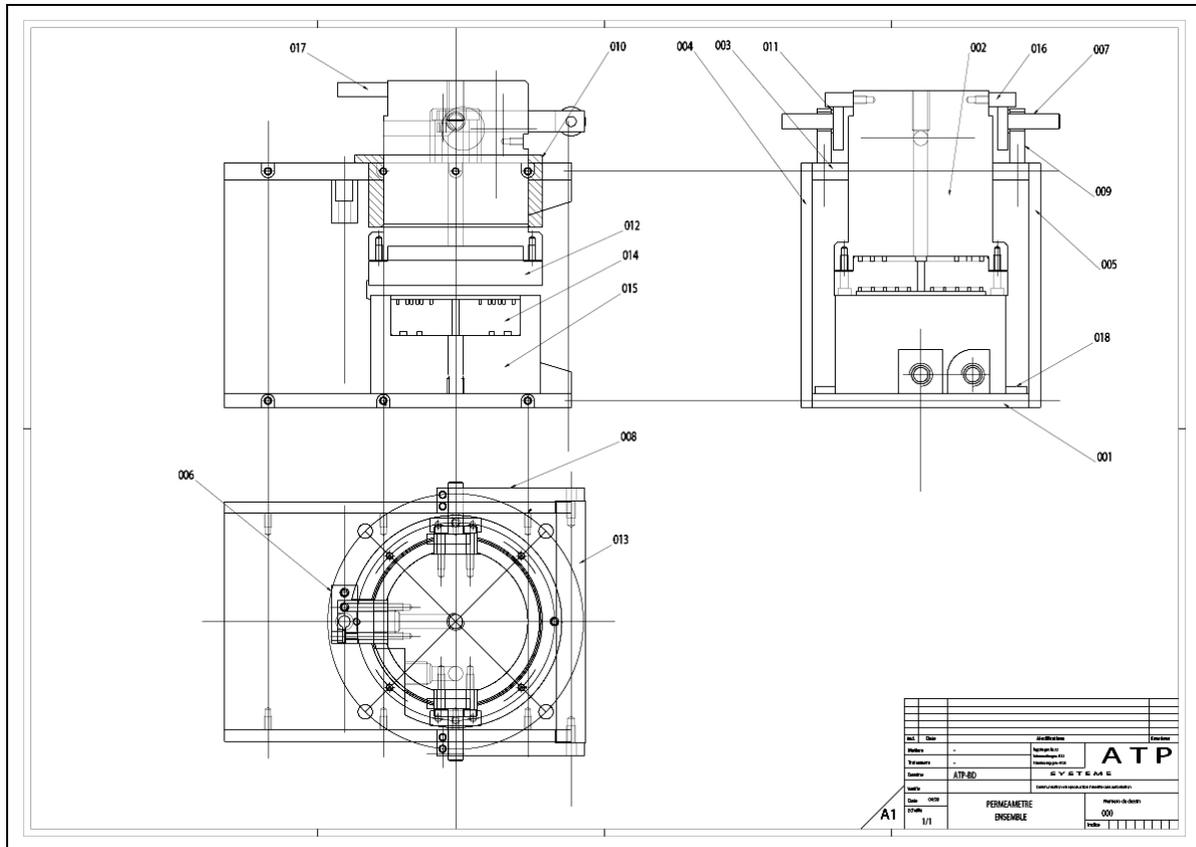


Figure II-13 : plan d'ensemble du perméamètre.

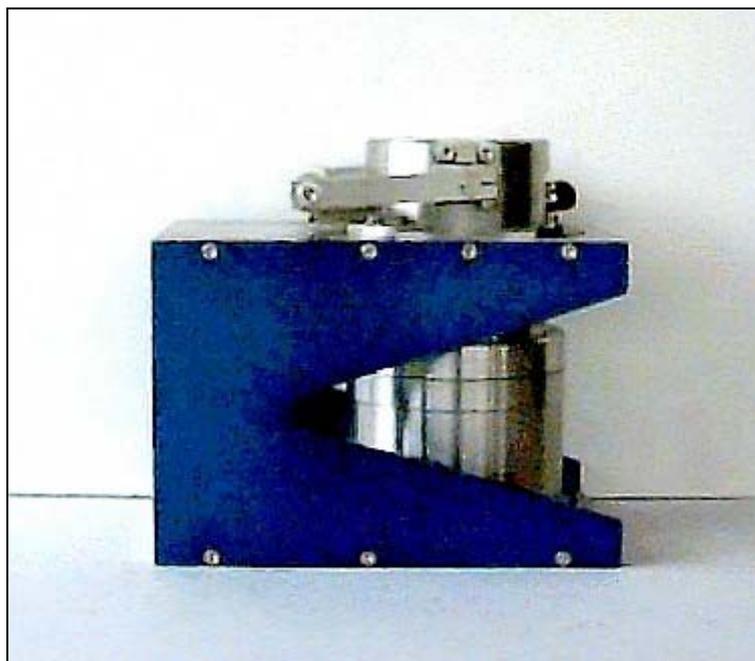


Figure II-14 : Photographie de l'appareil construit permettant de mesurer la perméabilité de textile.

Le perméamètre se connecte au circuit d'eau par l'intermédiaire de raccords rapides. Tous les tuyaux utilisés sont transparents ce qui permet de surveiller l'apparition éventuelle de bulles dans le circuit. Une pompe aspirante est utilisée afin de recycler l'eau. Un capteur LvdT est utilisé pour mesurer la position du piston. Une poignée est installée pour faciliter l'ouverture du perméamètre et l'installation d'un échantillon.

L'appareil expérimental réalisé impose un écoulement perpendiculaire au plan du feutre ou dans une direction du plan afin de mesurer la résistance à l'écoulement. Son encombrement est de 240 mm par 205 mm par 166 mm pour une masse de 25 kg. Il pourrait être éventuellement utilisé dans une section de presses, pendant l'arrêt de la machine à papier, afin de mesurer la résistance à l'écoulement des feutres.

## II.3 Essai de faisabilité.

### 3.1 Qualité de l'eau et formation de bulles.

Les premiers essais à vide ont montré que les plaques poreuses étaient très sensibles à la qualité de l'eau. Ces tests ont été conduits sans feutre et sans fuite latérale. La figure II-15 représente l'évolution de la perte de charge en fonction du débit. La perte de charge est divisée par la viscosité afin de s'affranchir des changements de température. La viscosité de l'eau est évaluée par l'intermédiaire de la formule de Bingham présentée ci-dessous.

$$\mu = \frac{0.1}{\left(2.1482 \cdot \left((T - 8.8432) + (8078.4 + (T - 8.435)^2)^{1/2}\right) - 120\right)} \quad \text{Équation II:10}$$

avec : T, la température en degrés Celsius,

$\mu$ , la viscosité dynamique de l'eau.

Ces résultats montrent qu'après plusieurs essais successifs, la perte de charge créée par les plaques poreuses augmente puis diminue après nettoyage. Pour prendre en compte cet encrassement, les caractéristiques des plaques sont mesurées avant chaque essai. Dès que la perte de charge devient trop importante, les plaques poreuses sont démontées et nettoyées à la soude (concentration 0,1 mol.l<sup>-1</sup>). Afin de limiter l'encrassement, un filtre à particules est installé sur le circuit.

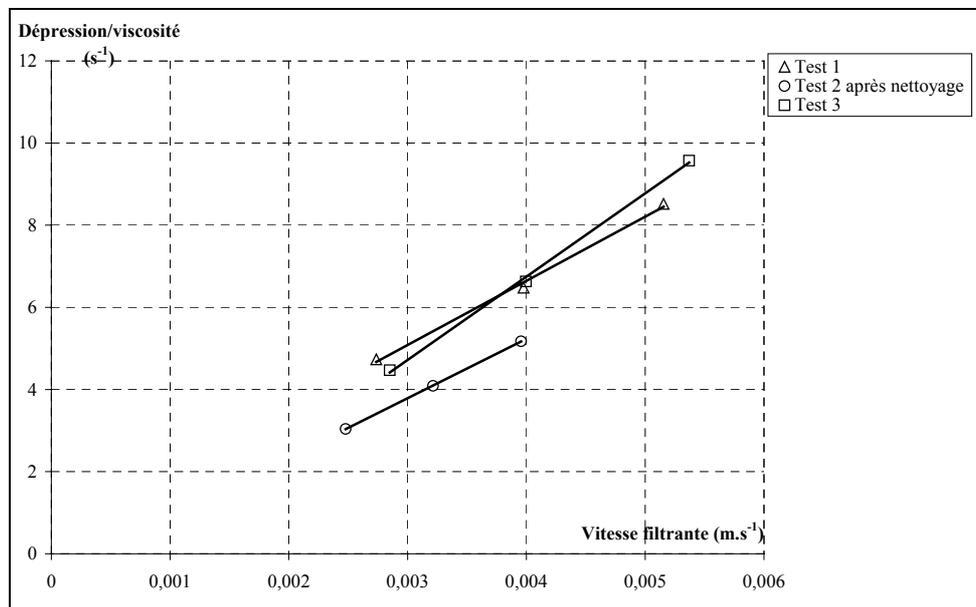


Figure II-15 : L'analyse de plusieurs essais successifs révèle l'encrassement des plaques poreuses. La dépression imposée est divisée par la viscosité de l'eau afin de s'affranchir de l'influence de la température.

Un autre problème pouvant survenir est la présence d'air dans les circuits alors que l'écoulement est supposé monophasique. La saturation permet de quantifier le remplissage de l'espace lacunaire ou alvéolaire d'un milieu poreux. Elle est souvent définie comme étant le rapport du volume d'eau par le volume des pores. L'influence du niveau de saturation est très importante vis à vis des résultats de mesure de résistance à l'écoulement. Ce point a été étudié par Wyckoff (Wyckoff R. D. et Botset H. G. 1936). Son étude expérimentale sur les écoulements biphasiques en régime stationnaire, i.e. conditions expérimentales constantes, montre que si la saturation n'est pas complète la perméabilité est fortement diminuée. Par exemple pour une saturation de 90%, la perméabilité diminue d'environ 30%. L'auteur montre qu'il existe une saturation critique (autour de 90%) au-delà de laquelle un régime stationnaire ne peut exister. La phase gazeuse s'accumule jusqu'à ce que la saturation diminue jusqu'à la valeur de la saturation critique (point à partir duquel l'écoulement de chaque phase devient stationnaire). Ainsi lorsque l'écoulement ne contient qu'une phase, la perméabilité mesurée est alors la perméabilité absolue. Dans le cas où l'écoulement est biphasique (air et eau), la perméabilité mesurée est au moins 10% plus faible.

Dans le cadre de nos travaux, l'eau est conditionnée à pression et température ambiante. Elle contient alors une certaine quantité d'air dissoute. Les bulles de gaz peuvent se former dès que les conditions thermodynamiques changent, i.e. si la température augmente ou si la pression diminue. De part la conception des circuits, l'eau entrant dans la cellule de mesure est à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Au contraire, les vases en aval créent une dépression nécessaire pour imposer la direction de l'écoulement. Les résultats de simulations numériques de l'écoulement dans les cellules transversales et longitudinales mettent en évidence les zones où la pression du fluide est inférieure à la pression atmosphérique (fig. II-16 à II-18). Dans le cas de la cellule dédiée à la perméabilité transversale, tant que la pression amont est supérieure à 1 bar, la zone à risque est confinée à l'intérieur de la plaque poreuse aval. Dans le cas de la cellule dédiée à la perméabilité longitudinale, cette zone à risque est très petite pour 2 bars (20 mCE) mais s'étend rapidement lorsque la pression aval diminue. Cependant lorsque le protocole expérimental (Chap. II.4.1) est respecté, aucune bulle n'est constatée pendant les acquisitions. L'écoulement peut donc être considéré comme monophasique.

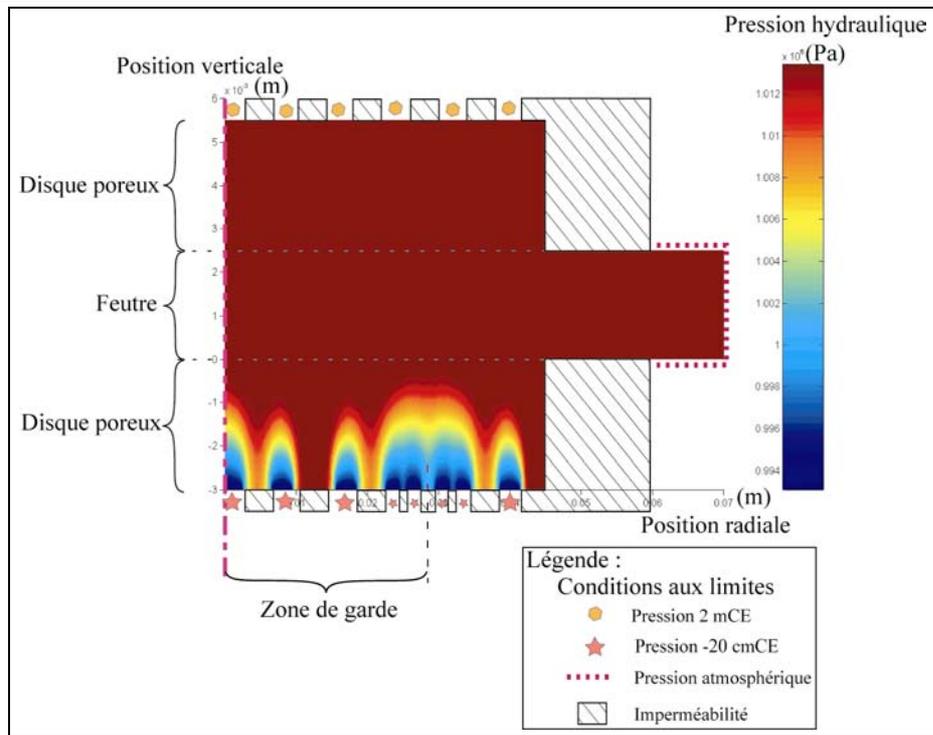


Figure II-16 : Simulation numérique du champ de pression inférieure à 1 atm dans le perméamètre transversal. Pression amont 2 mCE.

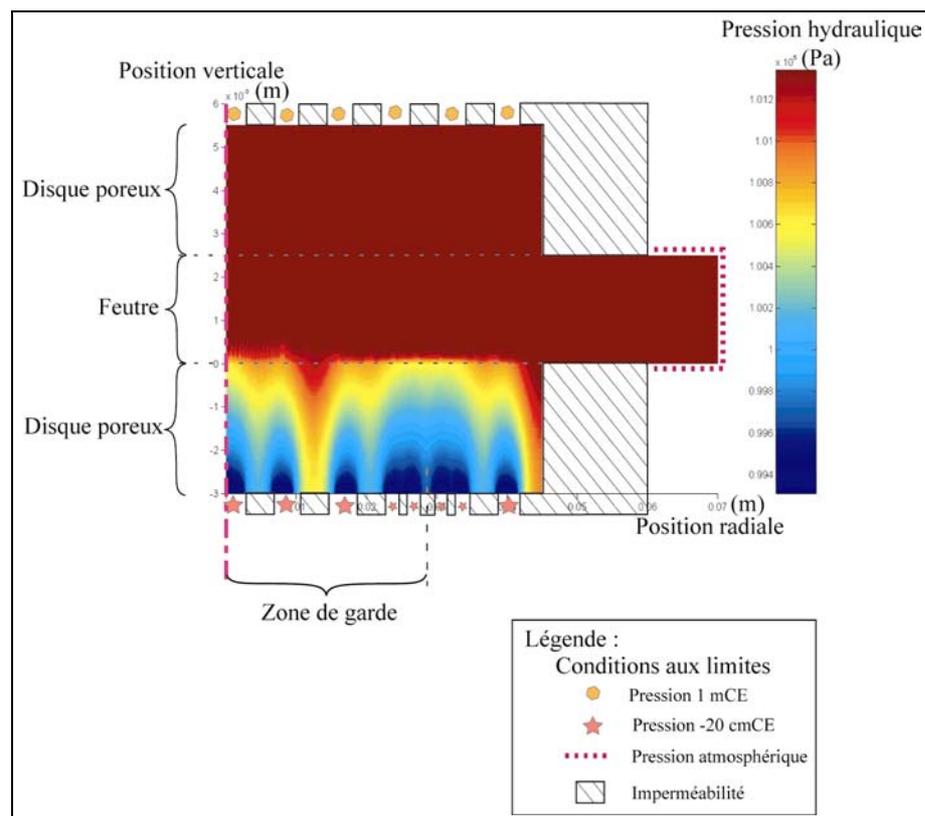
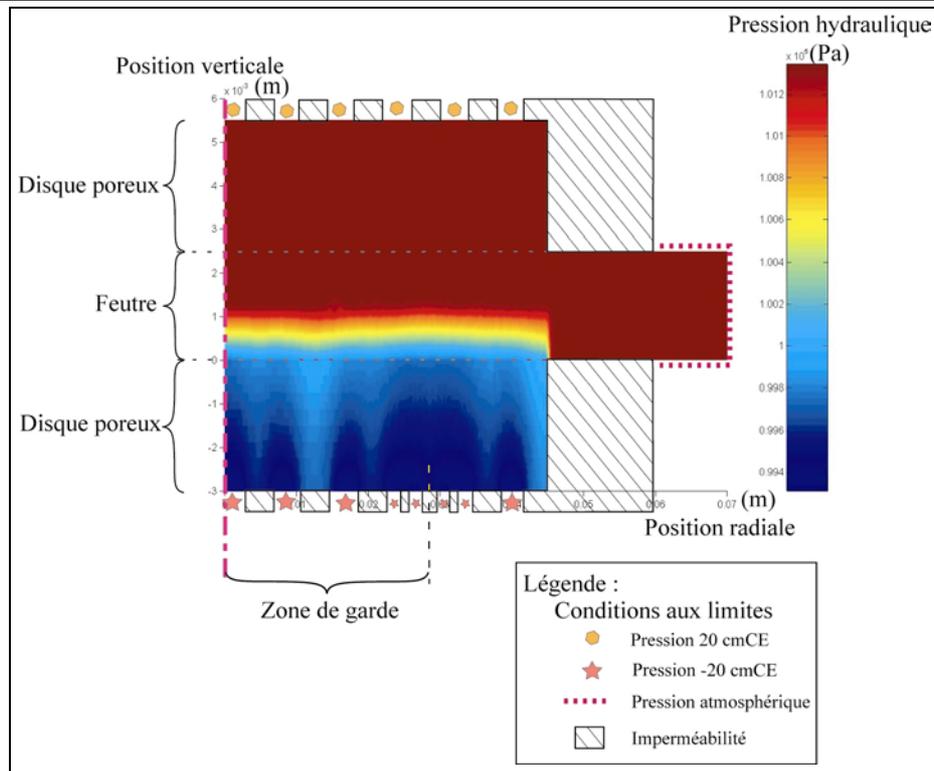


Figure II-17 : Simulation numérique du champ de pression inférieure à 1 atm dans le perméamètre transversal. Pression amont 1 mCE.



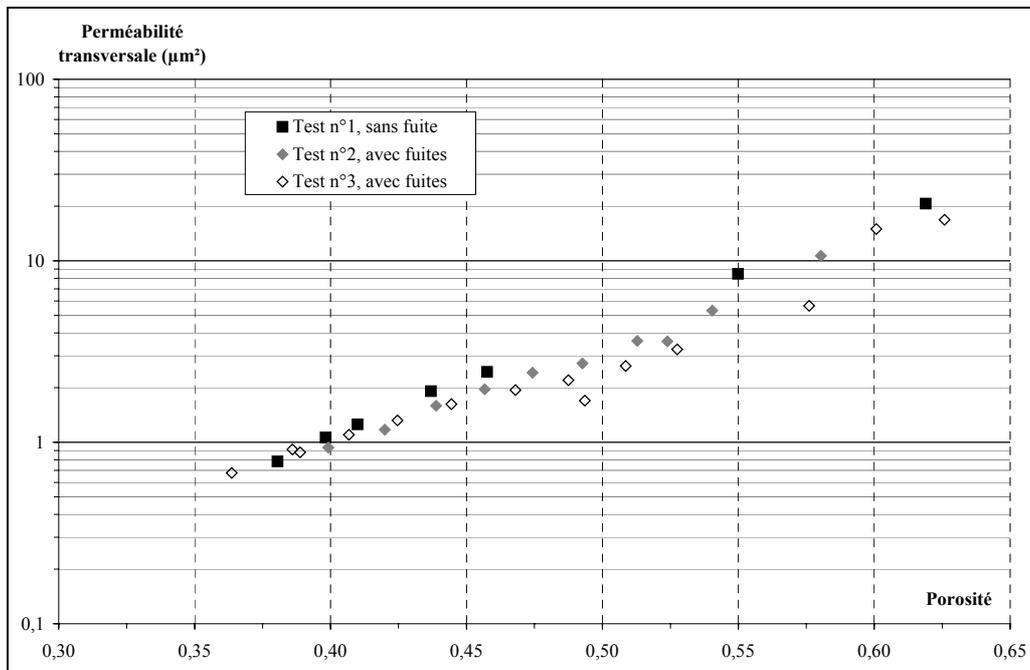
**Figure II-18 : Simulation numérique du champ de pression inférieure à 1 atm dans le perméamètre transversal. Pression 20 cmCE – -20 cmCE aval.**

Toutefois cette analyse n'est pas possible avec l'utilisation directe de l'eau du réseau de distribution car nous ne maîtrisons pas sa qualité. Il existe d'autres causes d'apparition de bulles dans le circuit :

- ⊗ une mauvaise saturation des circuits ou de l'appareil,
- ⊗ une augmentation de la température de l'eau,
- ⊗ une aspiration d'air par la fente centrale lorsque les débits deviennent faibles.

### 3.2 Fonctionnement de l'anneau de garde.

Afin de vérifier l'efficacité de la zone de garde, des essais avec fuites et sans fuite sont effectués avec un échantillon du même feutre. Pour réaliser l'étanchéité de la cellule, une membrane élastique est mise tout autour de la cellule. Dans un premier temps, le fonctionnement de l'anneau de garde de la cellule dédiée aux mesures de perméabilité transversale est étudié. Les perméabilités transversales de deux échantillons d'un même feutre sont mesurées pour plusieurs niveaux de déformations. Lorsque la porosité diminue de 0,64 à 0,30, la perméabilité diminue de deux ordres de grandeur. Cet échantillon est le plus épais de tous les feutres testés. La surface latérale où s'applique les conditions extérieures est ainsi maximum. Par conséquent, l'influence des fuites latérales sur les mesures est amplifiée. Le test 1 (fig. II-19) est réalisé avec la membrane afin d'empêcher les fuites. Les tests 2 et 3 (fig. II-19) sont réalisés sur le même échantillon de feutre mais sans la membrane.



**Figure II-19 : Comparaison des résultats de mesure de perméabilité avec et sans fuite latérale.**

Les résultats de la figure II-19 montrent que l'anneau de garde fonctionne assez bien car ils sont similaires pour tous les niveaux de déformation. La répétitivité est très bonne dans les deux cas, avec et sans fuite lorsque la porosité est inférieure à 0,5. La dispersion pour des porosités plus élevées est probablement due à la résistance des plaques poreuses. Celle-ci est, alors, du même ordre de grandeur que celle du feutre, ce qui engendre une erreur plus importante sur l'évaluation de la valeur de la perméabilité transversale du feutre (cf. calcul d'erreur sur les mesures de perméabilité II.3.4).

Dans un second temps, le fonctionnement de l'anneau de garde de la cellule dédiée aux mesures de perméabilité longitudinale est étudié. La perméabilité longitudinale d'un même échantillon de feutre est mesurée pour différents niveaux de déformations, avec et sans la membrane amovible (fig. II-20). L'orientation du feutre est identique pour les deux essais. Les résultats de ces mesures montrent que la zone de garde remplit très bien sa fonction que se soit en régime laminaire ou en régime transitoire. La séparation entre les deux régimes est située vers  $0,08 \text{ m.s}^{-1}$  ce qui est en accord avec les calculs du nombre de Reynolds effectués dans le paragraphe II.1.1.

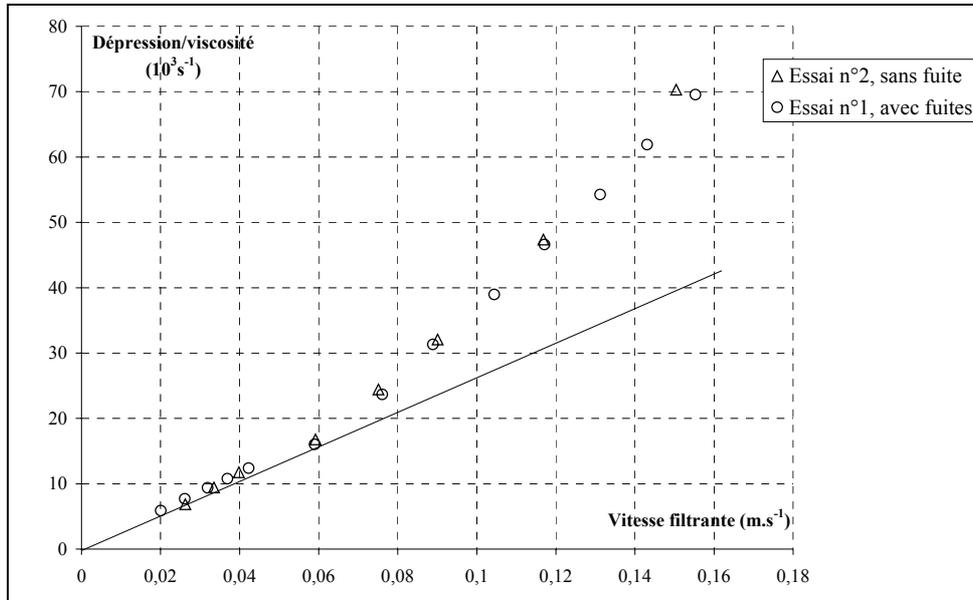


Figure II-20 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge divisé par la viscosité en fonction de la vitesse filtrante pour des essais avec et sans fuite latérale.

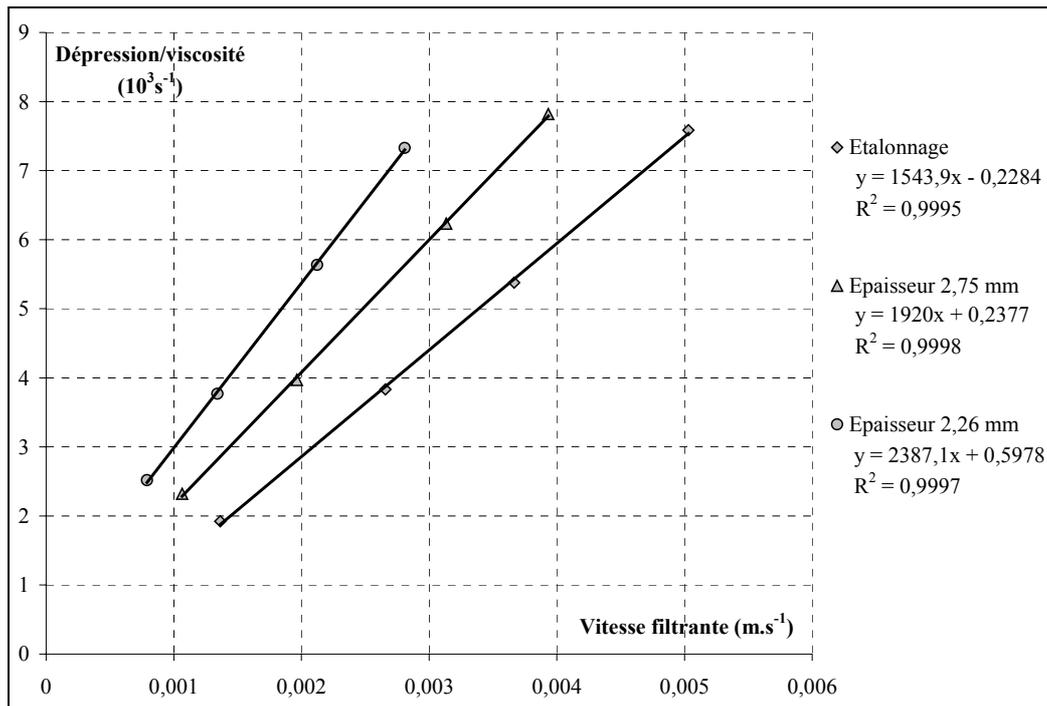
### 3.3 Calcul de la résistance à l'écoulement.

#### 3.3.a Description des données mesurées. Calcul de la viscosité.

Le débit traversant la zone de garde est évalué à partir de la masse d'eau qui s'est écoulée pendant une durée déterminée. La perte de charge est calculée en effectuant la différence entre les altitudes des vases à niveau constant. La température de l'eau est mesurée par un thermomètre à alcool. L'épaisseur de l'échantillon de feutre en compression est évaluée en connaissant la position du piston ainsi que la déformation des plaques poreuses. La pression totale imposée dans la cellule est directement reliée à la pression pneumatique dans le vérin. Dans cette évaluation, la pression hydraulique est négligée par rapport à la contrainte mécanique. La viscosité est évaluée selon la relation empirique de Bingham présentée dans l'équation II:10. La relation entre la viscosité, le débit et la différence de pression est étudiée dans le cas du perméamètre transversal ainsi que dans le cas du perméamètre longitudinal.

### 3.3.b Justification de l'utilisation de la loi de Darcy.

La relation entre perte de charge et vitesse filtrante est linéaire dans les gammes de vitesses testées. Sur les figures illustrant les résultats (fig. II-21 et II-22), le coefficient de corrélation est indiqué et valide le choix de la relation linéaire. L'application de la loi de Darcy est donc justifiée. Dans le cas du perméamètre transversal, des mesures identiques concernant l'appareil à vide ou avec un échantillon de feutre sont faites (figure II-21). Les résultats de ces mesures montrent que la perte de charge des plaques poreuses n'est pas négligeable et doit être prise en compte dans le calcul de la perméabilité.



**Figure II-21 : Évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse filtrante pour différents niveaux de déformation. Cas du perméamètre transversal.**

Dans le cas du perméamètre longitudinal, la perte de charge de l'appareil à vide est beaucoup plus faible que la perte de charge de l'appareil avec un échantillon de feutre. Les mesures de perte de charge à vide ont été réalisées pour différentes ouvertures de la cellule (cf. fig. II-21).

La relation perte de charge débit est la même quelle que soit l'ouverture de la cellule. Ceci signifie que la perte de charge créée par l'appareil est beaucoup plus faible que la perte de charge engendrée par l'ensemble du circuit hydraulique. Lors de mesures de perméabilité longitudinale sur des feutres, le débit maximum relevé est de 70 L/h pour une perte de charge de 200 kPa. La perte de charge de l'appareil à vide correspondant à ce débit est de 8 kPa, soit environ 25 fois plus petite. La perte de charge de l'appareil à vide est donc négligée lors de l'évaluation de la perméabilité longitudinale. Les relations mesurées sont, alors, directement reliées aux propriétés du feutre.

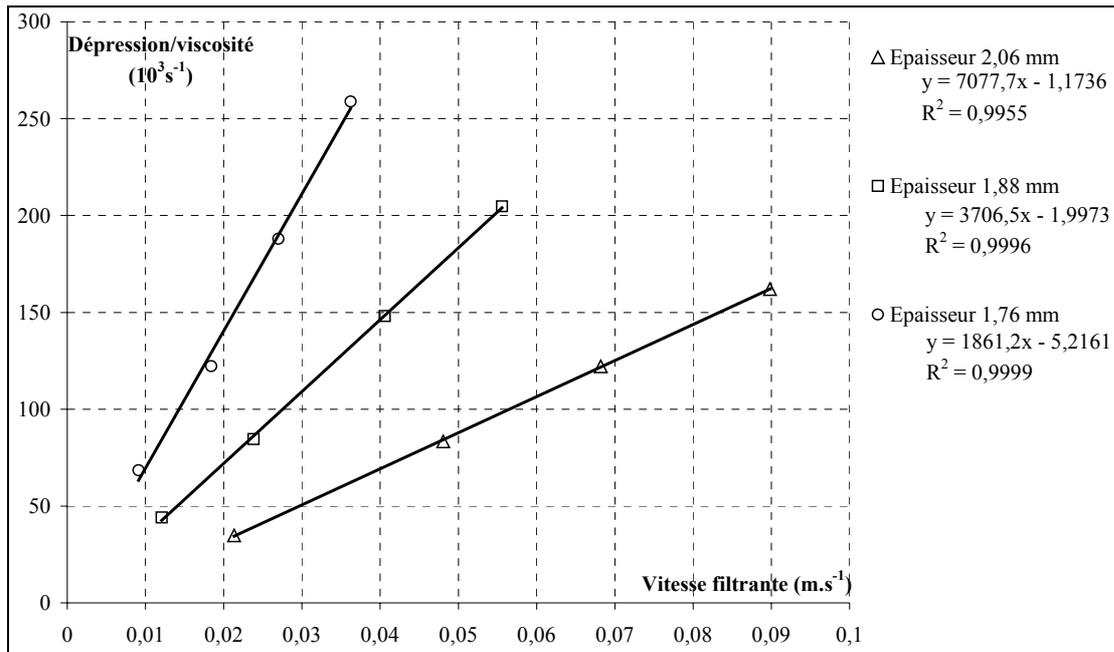


Figure II-22 : Évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse filtrante pour différents niveaux de déformation du feutre. Cas du perméamètre longitudinal.

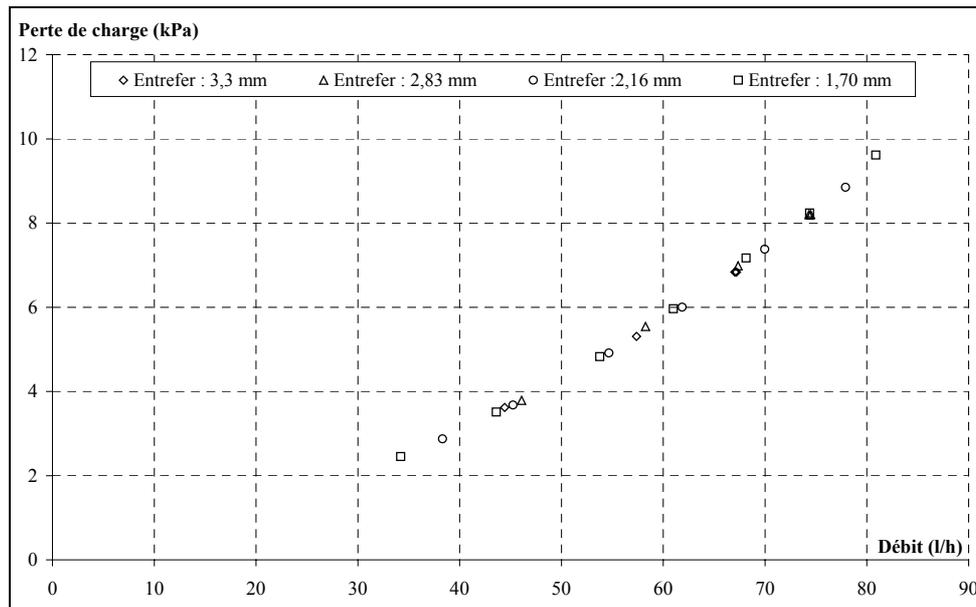


Figure II-23 : Évolution de la perte de charge du perméamètre à vide en fonction du débit traversant la zone de garde et de l'écart entre les disques fendus. Essais réalisés sans fuite latérale.

3.3.c Interprétation des mesures.

La charge H d'un circuit est définie par :

$$H = \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z \quad \text{Équation II:11}$$

avec: P, la pression hydraulique,  
 V, la vitesse filtrante,  
 z, l'altitude du point d'évaluation de la charge,  
 g, l'accélération due à la pesanteur,  
 ρ, la masse volumique du fluide.

Dans le cas où aucune dégradation d'énergie n'existe, la loi de Bernoulli s'applique, i.e. H est constant. Cependant, dans notre cas, des pertes de charge existent. Elles sont dues notamment à la dégradation d'énergie dans le feutre. La perte de charge ΔH du circuit expérimental s'exprime par :

$$H_{\text{aval}} - H_{\text{amont}} = \Delta H \quad \text{Équation II:12}$$

H<sub>aval</sub>, la charge en aval du perméamètre, et H<sub>amont</sub>, la charge en amont du perméamètre, sont déterminées au niveau de l'interface libre des vases respectifs. P est ainsi égale à la pression atmosphérique et z à l'altitude de l'interface. La contribution cinétique est négligeable face aux deux autres termes de l'équation.

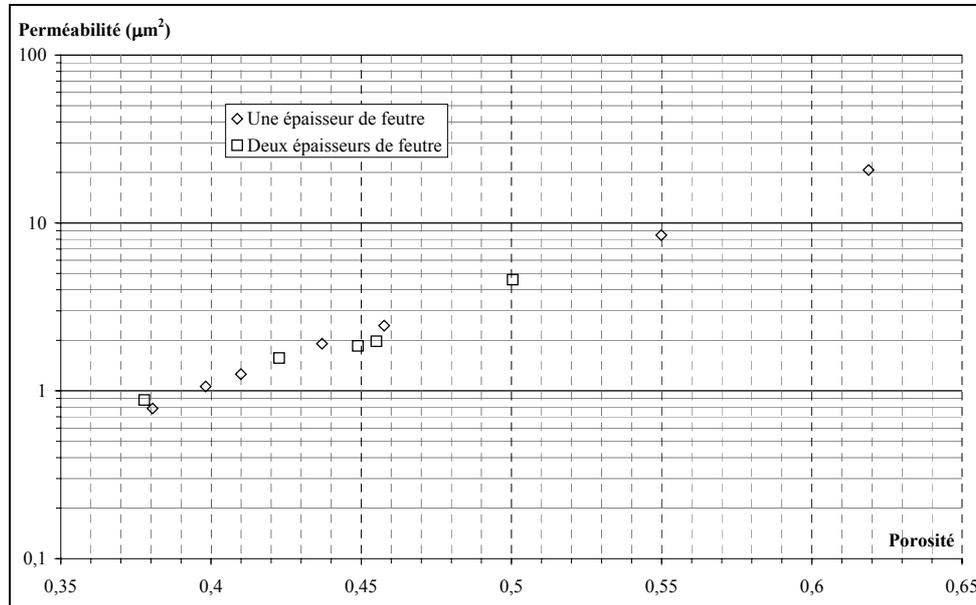
En supposant que les différentes sources de dégradation sont additives et indépendantes, la perte de charge due au feutre est déduite de celle de l'appareil avec un feutre et de celle de l'appareil à vide.

Dans le cas de la cellule dédiée à la perméabilité transversale, la vitesse filtrante v est connue par les mesures de débit Q et l'aire de la zone de garde notée S. Le produit de la viscosité par le débit (μ.Q) ainsi que la pression P sont corrélés linéairement. Le résultat de la régression linéaire lors de l'étalonnage de l'appareil est noté, A<sub>o</sub> et A<sub>m</sub> dans le cas d'une mesure avec un échantillon de feutre. La perméabilité du feutre est alors calculée ainsi :

$$K = \left( \frac{1}{A_o} - \frac{1}{A_m} \right) \cdot \frac{e}{S} \quad \text{Équation II:13}$$

où A<sub>o</sub> et A<sub>m</sub>, résultats des régressions linéaires sur les données expérimentales,  
 e est l'épaisseur du feutre,  
 S, aire de la zone de garde.

Afin de vérifier que les mesures de perméabilités sont intrinsèques au matériau testé, un essai est effectué avec un empilement de deux échantillons de feutre (fig. II-24). Pour cet essai, la membrane est mise en place pour éviter les fuites trop importantes. Les résultats de ces expériences montrent que la perméabilité mesurée est indépendante du nombre d'échantillons testés et par conséquent la mesure de la perméabilité est bien intrinsèque au matériau.



**Figure II-24 : Comparaison de mesures de la perméabilité transversale avec une et deux épaisseurs de feutre.**

Dans le cas de la perméabilité longitudinale, la distance entre les fentes est utilisée pour calculer le gradient de pression. Elle est notée  $L_f$ . Cependant dans ce cas, la surface  $S$  (aire de la zone de garde) dépend de l'épaisseur du feutre. Le calcul de perméabilité s'écrit alors :

$$K = \frac{1}{A_m} \cdot \frac{L_f}{S} \quad \text{Équation II:14}$$

Lors de la mesure hors axes principaux de la perméabilité dans le plan du feutre, le tenseur des perméabilités s'écrit :

$$\underline{K} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_M \cos^2(\theta) + K_m \sin^2(\theta) & (K_m - K_M) \cos(\theta) \sin(\theta) \\ (K_m - K_M) \cos(\theta) \sin(\theta) & K_m \cos^2(\theta) + K_M \sin^2(\theta) \end{pmatrix}_{\text{repère d'étude}} \quad \text{Équation II:15}$$

avec :  $K_M$ , la composante maximale de la perméabilité dans le repère principal,  
 $K_m$ , la composante minimale de la perméabilité dans le repère principal,  
 $\theta$ , l'angle entre la direction de mesure et la direction principale correspondant à  $K_M$ .

Le débit est, par définition, le flux de l'écoulement de fluide à travers une surface arbitraire dans notre cas la section verticale de la zone de garde, S. L'expression mathématique de ceci est :

$$Q = \int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, ds \quad \text{Équation II:16}$$

où :

- Q est le débit mesuré pour la moitié de la cellule,
- $\mathbf{v}$ , le vecteur vitesse filtrante,
- $\mathbf{n}$ , la normale à la surface de contrôle choisie pour mesurer le débit, i.e. la section transversale de la zone de garde,
- $ds$ , un élément unitaire de cette surface.

Pour les mesures de perméabilité longitudinale, la direction du gradient de pression dans la zone de garde est supposée être imposée perpendiculairement aux fentes. La direction de la normale à la surface de contrôle est identique à celle du gradient de pression. L'équation II-16 devient alors :

$$Q = \int_S -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \mathbf{grad}(P) \cdot \mathbf{n} \, ds \quad \text{Équation II:17}$$

$$Q = \int_S -\frac{1}{\mu} \cdot \left[ \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{dp}{dx} \\ 0 \end{pmatrix} \right] \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot ds \quad \text{Équation II:18}$$

$$Q = \int_S -\frac{1}{\mu} \cdot K_{xx} \frac{dp}{dx} \cdot ds \quad \text{Équation II:19}$$

Considérant le matériau homogène et le gradient de pression uniforme dans la zone de garde, l'intégrale devient finalement :

$$Q = -\frac{1}{\mu} \cdot K_{xx} \frac{\Delta P}{L_f} \cdot S \quad \text{Équation II:20}$$

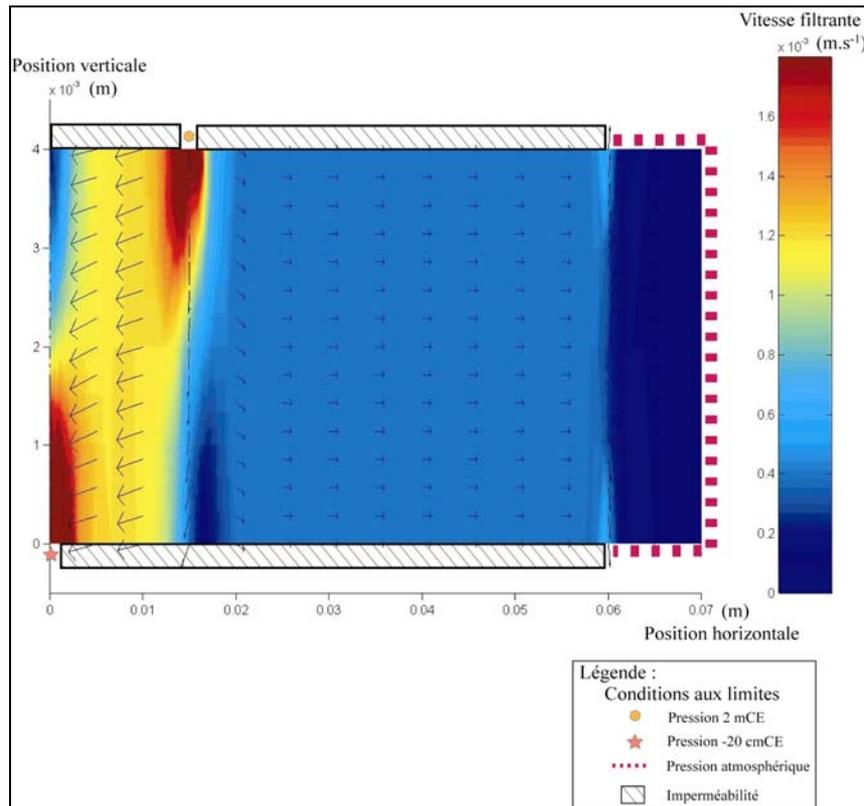
où S est l'aire de la section transversale de la zone de garde (produit de sa largeur par sa hauteur, i.e. l'épaisseur du feutre),

$L_f$  est la distance entre une fente externe et la fente centrale.

Si la cellule est prise en compte dans sa globalité, l'équation II:14 devient alors avec le débit total :

$$Q_{\text{Total}} = -2 \cdot \frac{1}{\mu} \cdot K_{xx} \frac{\Delta P}{L_f} \cdot S \quad \text{Équation II:21}$$

Si toutes les fentes sont positionnées du même côté du feutre, l'écoulement peut avoir lieu dans une zone restreinte du feutre. Comme les deux fentes externes sont situées au-dessus de l'échantillon et que la fente centrale est au-dessous, le fluide doit traverser le feutre lors de l'écoulement longitudinal. Il est donc nécessaire de connaître dans quelle mesure la perméabilité transversale influence la mesure de la perméabilité longitudinale. À cet effet une modélisation de l'écoulement dans une section transversale a été effectuée. Le problème est considéré comme plan avec un axe de symétrie. Les conditions aux limites sont indiquées sur la figure II-25 représentant les résultats de calcul.



**Figure II-25 : Simulation de l'écoulement dans une section transversale de la cellule dédiée à la perméabilité longitudinale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches.**

La simulation montre que le gradient de pression n'est pas horizontal. Si le gradient était orienté horizontalement, la relation entre le débit total et la perte de charge serait l'équation II:21.

Pour corriger cette expression, on peut considérer la perte de charge suivant une ligne de courant et la décomposer sur la verticale et l'horizontale. La différentielle s'écrit :

$$dP = \frac{\partial P}{\partial x} dx + \frac{\partial P}{\partial y} dy \quad \text{Équation II:22}$$

Le gradient de pression est relié au champ de vitesse filtrante par la loi de Darcy :

$$\begin{pmatrix} v_L \\ v_T \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \cdot \begin{pmatrix} K_L & 0 \\ 0 & K_T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \end{pmatrix} \quad \text{Équations II:23}$$

avec  $v_L$  la composante de la vitesse longitudinale  
 $v_T$  le composante de la vitesse transversale

Cette expression est injectée dans l'équation II:22. On obtient alors :

$$dP = -\mu \cdot \left( \frac{v_L}{K_L} dx + \frac{v_T}{K_T} dy \right) \quad \text{Équation II:24}$$

En moyennant, la différentielle sur toutes les lignes de courants, les composantes de vitesse filtrante sont moyennées par :

$$v_L = \frac{Q}{S_T} \quad v_T = \frac{Q}{S_L} \quad \text{Équations II:25}$$

où  $S_L$  et  $S_T$  sont respectivement la section longitudinale (largeur de la zone de garde ( $l$ ) multipliée par la distance entre les fentes externes ( $L_f$ )), et la section transversale ( $l$  multipliée par distance par l'épaisseur du feutre ( $e$ )).

L'intégration sur les lignes de courant donne :

$$\Delta P = -\mu \frac{Q}{2} \cdot \left( \frac{L_f}{K_L \cdot S_T} + \frac{e}{K_T \cdot S_L} \right) \quad \text{Équations II:26}$$

$$\Delta P = -\mu \frac{Q}{2 \cdot l} \cdot \left( \frac{L_f}{K_L \cdot e} + \frac{e}{K_T \cdot L_f} \right)$$

### 3.4 Calcul d'erreur.

Les mesures de perméabilité sont faites en utilisant la loi de Darcy (cf. Équation II:6). On note  $\Delta X$  l'erreur ou l'intervalle d'incertitude de la variable  $X$ .

#### 3.4.a Erreur due aux lectures de mesures.

La lecture de la pression (de quelques kPa à une dizaine de kPa) sur la règle verticale est faite à 1 mmCE près (10 Pa). L'intervalle d'incertitude sur la différence de pression est de 20 Pa. La mesure du débit se fait par pesée (masse,  $M$ ) et chronométrage (temps,  $t$ ), les erreurs commises sont de 5 g pour la pesée (étendue expérimentale de mesure de 100g à 1,5 Kg) et de 1 s pour le chronométrage (étendue expérimentale de mesure de 1 min à 20 min). La température est mesurée avec un thermomètre à alcool précis à 0,5 °C près. Le capteur de déplacement LvdT permet une précision de 20  $\mu$ m sur la mesure d'épaisseur du feutre.

## 3.4.b Erreur induite par la transformation des données avant corrélation.

Erreur sur le calcul du débit :

$$Q = \frac{M}{t} \Rightarrow \frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta t}{t} \quad \text{Équation II:27}$$

Erreur sur l'évaluation de la viscosité :

La dérivée de cette formule par rapport à la température est :

$$\frac{d\mu}{dT} = 0.1 \cdot \left| \frac{2.1482 \cdot \left(1 + (T - 8.435)(8078.4 + (T - 8.435)^2)^{-1/2}\right)}{\left(2.1482 \cdot \left((T - 8.435) + (8078.4 + (T - 8.435)^2)^{1/2}\right) - 120\right)^2} \right|$$

L'intervalle d'incertitude sur la viscosité relativement à la température est donnée par la formule :

$$\Delta\mu = 10\mu^2 \cdot \left| 2.1482 \cdot \left(1 + (T - 8.435)(8078.4 + (T - 8.435)^2)^{-1/2}\right) \right| \Delta T \quad \text{Équation II:28}$$

## 3.4.c Erreur induite par la corrélation utilisant la méthode des moindres carrés.

Les N mesures de  $\mu Q$  et P sont d'abord corrélées.

$$S_{qq} = \sum_1^N (\mu Q - \overline{\mu Q})^2 \quad S_{pq} = \sum_1^N (\mu Q - \overline{\mu Q})(P - \overline{P}) \quad A = \frac{S_{pq}}{S_{qq}}$$

La différentielle de A s'écrit :

$$dA = \frac{\partial}{\partial P} \left( \frac{S_{pq}}{S_{qq}} \right) dP + \frac{\partial}{\partial Q} \left( \frac{S_{pq}}{S_{qq}} \right) dQ + \frac{\partial}{\partial \mu} \left( \frac{S_{pq}}{S_{qq}} \right) d\mu$$

$$dA = \frac{1}{S_{qq}} \frac{\partial}{\partial P} (S_{pq}) dP + \frac{S_{qq} \frac{\partial}{\partial Q} S_{pq} - S_{pq} \frac{\partial}{\partial Q} S_{qq}}{S_{qq}^2} dQ + \frac{S_{qq} \frac{\partial}{\partial \mu} S_{pq} - S_{pq} \frac{\partial}{\partial \mu} S_{qq}}{S_{qq}^2} d\mu$$

où :

$$\frac{\partial S_{qq}}{\partial Q} dQ = \sum_1^N 2(\mu dQ - \frac{1}{N} \sum_1^N \mu dQ)(\mu Q - \overline{\mu Q}) \quad \frac{\partial S_{qq}}{\partial \mu} d\mu = \sum_1^N 2(Q d\mu - \frac{1}{N} \sum_1^N Q d\mu)(\mu Q - \overline{\mu Q})$$

$$\frac{\partial S_{pq}}{\partial Q} dQ = \sum_1^N (\mu \mu d - \frac{1}{N} \sum_1^N \mu dQ)(P - \overline{P}) \quad \frac{\partial S_{pq}}{\partial \mu} d\mu = \sum_1^N (Q d\mu - \frac{1}{N} \sum_1^N Q d\mu)(P - \overline{P})$$

$$\frac{\partial S_{pq}}{\partial P} dP = \sum_1^N (\mu Q dP - \sum_1^N \mu Q dP)$$

Les erreurs sur les différents termes s'écrivent:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{qq}}{\partial Q} \Delta Q &= \sum_1^N 2(\mu \Delta Q + \overline{\mu \Delta Q})(\mu Q - \overline{\mu Q}) & \frac{\partial S_{qq}}{\partial \mu} \Delta \mu &= \sum_1^N 2(Q \Delta \mu + \overline{Q \Delta \mu})(\mu Q - \overline{\mu Q}) \\ \frac{\partial S_{pq}}{\partial Q} \Delta Q &= \sum_1^N (\mu \Delta Q + \overline{\mu \Delta Q})(P - \overline{P}) & \frac{\partial S_{pq}}{\partial \mu} \Delta \mu &= \sum_1^N (Q \Delta \mu - \overline{Q \Delta \mu})(P - \overline{P}) \\ \frac{\partial S_{pq}}{\partial P} \Delta P &= \sum_1^N (\mu Q \Delta P + \overline{\mu Q \Delta P}) \end{aligned}$$

L'erreur relative sur A devient :

$$\frac{\Delta A}{A} = \sum_1^N \left[ \frac{\mu Q \Delta P + \overline{\mu Q \Delta P}}{S_{pq}} + \frac{(\mu \Delta Q + \overline{\mu \Delta Q})(P - \overline{P})}{S_{pq}} + \frac{2(\mu \Delta Q + \overline{\mu \Delta Q})(\mu Q - \overline{\mu Q})}{S_{qq}} + \frac{(Q \Delta \mu - \overline{Q \Delta \mu})(P - \overline{P})}{S_{pq}} + \frac{2(\mu \Delta Q + \overline{\mu \Delta Q})(\mu Q - \overline{\mu Q})}{S_{qq}} \right]$$

Équation II:29

3.4.d Erreur induite par le calcul de la perméabilité.

Cas de la perméabilité transversale :

$$K = \left( \frac{1}{A_o} - \frac{1}{A_m} \right) \cdot \frac{e}{S} \Rightarrow \frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta \left( \frac{1}{A_o} - \frac{1}{A_m} \right)}{\left( \frac{1}{A_o} - \frac{1}{A_m} \right)} + \frac{\Delta e}{e}$$

L'erreur sur la zone de garde n'est pas prise en compte car impossible à évaluer.

$$\frac{\Delta \left( \frac{1}{A_o} - \frac{1}{A_m} \right)}{\left( \frac{1}{A_o} - \frac{1}{A_m} \right)} = \frac{A_m}{A_m - A_o} \cdot \frac{\Delta A_o}{A_o} + \frac{A_o}{A_m - A_o} \cdot \frac{\Delta A_m}{A_m}$$

Finalement, l'erreur sur la mesure de la perméabilité est :

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{A_m}{A_m - A_o} \cdot \frac{\Delta A_o}{A_o} + \frac{A_o}{A_m - A_o} \cdot \frac{\Delta A_m}{A_m} + \frac{\Delta e}{e}$$

Équation II:30

Nous pouvons remarquer ici que plus la différence entre  $A_o$  et  $A_m$  est grande, plus faible est l'erreur sur la mesure de la perméabilité.

Cas de la perméabilité longitudinale :

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta A_m}{A_m} + \frac{\Delta e}{e}$$

Équation II:31

L'erreur sur la largeur de la zone de garde n'est pas prise en compte car elle est très difficile à évaluer.

## II.4 Protocole des mesures de perméabilité.

Avant chaque campagne expérimentale, afin de prévenir un dysfonctionnement des appareils électroniques, ceux-ci sont mis sous tension 12 heures minimum avant le début de l'essai et sont étalonnés. Lors de la mise en tension du feutre, un conditionnement spécial est effectué sur le feutre. Afin de maintenir sec l'échantillon de feutre entre les mâchoires du cadre de mise en tension pour maintenir un coefficient de friction le plus élevé possible. Pour cela, une barrière étanche est créée avec du suif.

### 4.1 Mesure de la perméabilité transversale.

Toutes les mesures sont effectuées en suivant le protocole suivant :

- ⊗ Saturation de l'échantillon 24 h minimum avant l'essai.
- ⊗ Saturation des circuits avec l'eau du réseau sous pression puis remplacement avec l'eau prélevée 24 h auparavant.
- ⊗ Application d'une petite sollicitation en compression pour maintenir la cellule fermée.
- ⊗ Acquisition de la relation perte de charge débit de l'appareil à vide : recherche du régime stationnaire pendant 5 min entre chaque changement de pression.
- ⊗ Mise sous pression hydraulique (quelques centimètres de colonne d'eau) des disques poreux et ouverture de l'appareil.
- ⊗ Mise en place de l'échantillon saturé.
- ⊗ Application de la sollicitation, d'abord mise en tension puis en compression : 15 à 20 min d'attente pour être dans des conditions stationnaires.
- ⊗ Acquisition de la relation perte de charge/débit : recherche du régime stationnaire pendant 5 min entre chaque changement de pression.
- ⊗ Application du niveau de déformation supérieure et reprise étape précédente.
- ⊗ Démontage.

#### 4.2 Mesure de la perméabilité longitudinale.

Toutes les mesures sont effectuées en suivant le protocole suivant :

- ⊗ Saturation de l'échantillon 24 h minimum avant l'essai.
- ⊗ Saturation des circuits avec l'eau du réseau sous pression puis remplacement avec l'eau prélevée 24 h auparavant.
- ⊗ Mise sous pression hydraulique amont et aval (quelques centimètres de colonne d'eau) des disques fendus et ouverture de l'appareil.
- ⊗ Mise en place de l'échantillon saturé.
- ⊗ Application de la sollicitation, d'abord mise en tension puis en compression : 15 à 20 min d'attente pour être dans des conditions stationnaires.
- ⊗ Acquisition de la relation perte de charge débit : recherche du régime stationnaire pendant 5 min entre chaque changement de pression.
- ⊗ Application du niveau de déformation supérieure et reprise étape précédente.
  - ⊗ Démontage.
  - ⊗ Repérage du feutre pour mesure plus précise de l'orientation.

## CHAPITRE III

# *RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES MESURES DE PERMÉABILITÉ*



### Chapitre III : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES MESURES DE PERMÉABILITÉ.

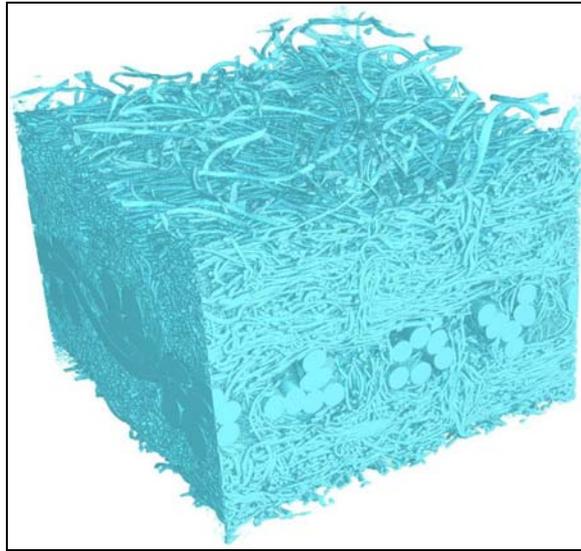
L'étude du tenseur des perméabilités des feutres réalisée dans cette partie porte sur 8 feutres différents, tous constitués de nylon. Le tableau n° 1 présente leur grammage total ainsi que la répartition en grammage de voile et de canevas. D'autres caractéristiques, telles que la taille des fibres et des fils, sont présentées en annexe B. On pourra noter que lorsque le grammage total du feutre augmente, le grammage de voile diminue. Cette tendance nous empêche d'étudier l'influence sur les propriétés du feutre de ces paramètres de fabrication indépendamment l'un de l'autre.

Nom	Grammage total (g/m <sup>2</sup> )	Grammage du canevas (g/m <sup>2</sup> )	Grammage des voiles (g/m <sup>2</sup> )	Pourcentage massique des voiles
A1	1230	420	810	66%
A2	1235	420	815	66%
A3	1210	420	790	65%
A4	1245	420	825	66%
A221	1550	-	-	
A249	1380	660	720	52%
B1	1600	890	710	44%
B2	1600	-	-	

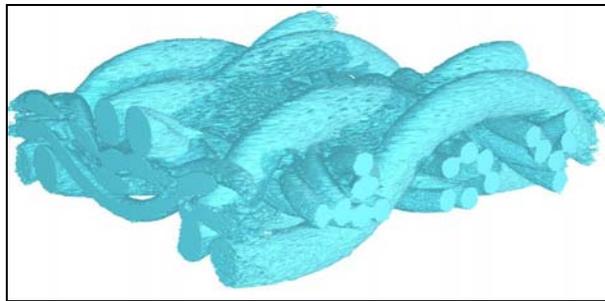
Tableau 1 : Propriétés des feutres testés.

Les feutres A1, A2, A3 et A4 ont des caractéristiques massiques proches. La conception de leur canevas repose sur la même armure simple (fig. III-1 et III-2). Les différences entre ces feutres résident essentiellement dans l'orientation des voiles qui est réalisée lors de l'étape de cardage. Les fibres des voiles du feutre A1 sont orientées préférentiellement dans le sens perpendiculaire au sens marche de la machine à papier ( ou sens travers). Celles des voiles du feutre A2 n'ont subi aucune orientation (distribution isotrope des orientations). Concernant le feutre A3, les fibres de ses voiles sont orientées préférentiellement dans le sens marche. Les voiles du feutre A4 sont constitués par la superposition de plusieurs couches de fibres orientées préférentiellement alternativement à 45° de part et d'autre du sens marche de la machine à papier.

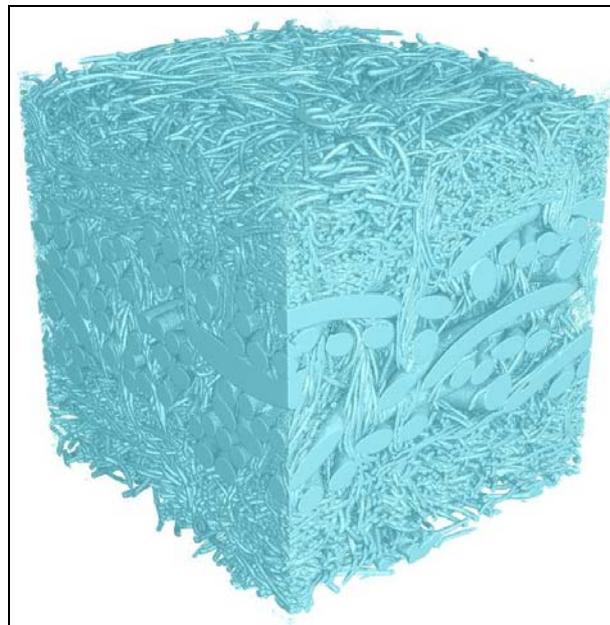
Les feutres A221, A249, B1 et B2 ont deux canevas superposés (fig. III-3). Le canevas coté papier est une armure simple, celui coté rouleau est une armure double.



**Figure III-1 : Exemple de feutre avec un seul canevas. Ici le cas du feutre A1.**



**Figure III-2 : Illustration du canevas commun aux feutres A1, A2, A3 et A4.**



**Figure III-3 : Exemple de feutre avec des canevas superposés. Ici le cas du feutre B1.**

Tous les échantillons testés sont issus d'échantillons témoins de feutres utilisés industriellement dans le cadre du pressage du papier. Cependant, les échantillons de feutre B1 proviennent de rognures de fabrication. Lors de la fabrication du feutre, les effets de bord sont tels que deux bandes d'une largeur de 30 à 40 cm de chaque cotés du feutre sont enlevées car elles présentent des caractéristiques différentes et une qualité moindre que la partie centrale de

la production. Pour tous les feutres testés, la taille de l'échantillon est au moins de 21 par 29 mm<sup>2</sup>. Disposant de peu d'échantillons de feutres, ils sont utilisés plusieurs fois pour effectuer des mesures de perméabilité. La rhéologie des feutres puis le tenseur des perméabilités sont successivement présentés.

### III.1 Quelques résultats de compression.

#### 1.1 Résultats rhéologiques.

Connaissant la force appliquée sur la cellule ainsi que l'épaisseur du feutre, il est possible d'analyser la rhéologie des feutres testés. Généralement, après plusieurs cycles de compression - relaxation, l'épaisseur du feutre à une contrainte donnée décroît rapidement puis se stabilise. Ce phénomène est appelé compactage. Suivant les études rhéologiques réalisées sur ce sujet, une centaine de cycles de compression relaxation de 0 à 2.5 MPa exécutés rapidement suffisent pour atteindre la stabilisation (Chevallier P. 1988 ; Lopez S. 1991). Cette préparation, nécessaire dans le cas du pressage afin d'obtenir des propriétés stabilisées du feutre, n'a pas été mise en place dans le cadre de cette étude en raison des dimensions des échantillons testés et des caractéristiques des presses disponibles. De plus, en considérant que la perméabilité dépend uniquement de l'état de déformation du matériau, i.e. à une épaisseur donnée de matériau déformé correspond une valeur unique de perméabilité, la préparation des feutres devient alors inutile dans le cadre de la caractérisation de la résistance à l'écoulement.

Généralement, pour caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau, ses déformations sont étudiées en fonction des contraintes qui le sollicitent, ou inversement. Les déformations sont évaluées en comparant l'état sous sollicitations, à l'état de référence qui est souvent l'état au repos. L'expression de la déformation est alors donnée par l'équation III:1

$$s = \frac{e_0 - e}{e_0} \quad \text{Équation III:1}$$

avec  $s$ , la déformation,  
 $e_0$ , l'épaisseur au repos, i.e. sans contrainte,  
 $e$ , l'épaisseur dans l'état étudié.

Cependant, concernant la compression d'un matériau fibreux, la définition d'un état initial est délicate. En effet, il est quasiment impossible de mesurer une épaisseur sans déformer le matériau. Pour cette raison, la mesure d'épaisseur du papier est normalisée. L'appareil utilisé pour cette mesure s'appelle un épaisseurmètre. Les dimensions de son palpeur, sa vitesse d'approche et sa pression lors de la mesure sont strictement définies par des normes.

Les épaisseurs, dont est doté le laboratoire, ne peuvent pas être utilisés dans le cas du feutre car leur ouverture n'est que de 4 mm. Les feutres les plus épais, étudiés dans ce travail, ne peuvent pas être placés sous le palpeur.

Nous avons choisi l'épaisseur irréductible comme épaisseur de référence pour cette étude. L'épaisseur irréductible ( $e_i$ ) (ou épaisseur de solide) est l'épaisseur qu'aurait le feutre si aucun vide n'était présent dans la structure. Cette épaisseur irréductible est évaluée d'après le grammage ( $W$ ) et la masse volumique du constituant ( $\rho_f$ ). L'avantage immédiat de cette référence est que la définition de la déformation correspondante est alors la même que celle de la porosité  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \frac{e - e_i}{e} \quad \text{Calcul de la porosité, Équation III:2}$$

avec  $e$ , épaisseur de matériau

$$e_i, \text{ épaisseur irréductible } e_i = \frac{W}{\rho_f}$$

La relation entre les deux définitions de la déformation est alors la suivante :

$$(1 - s) \cdot (1 - \varepsilon) = \frac{e_i}{e_o} \quad \text{Équation III:3}$$

Tous les essais ont eu lieu à température quasiment constante (variation maximale de deux degrés au cours d'un essai). Les températures sont comprises entre 18°C et 21°C. Aucune influence de ce paramètre thermique sur la rhéologie du feutre n'a été décelée dans cette étendue. La plus faible contrainte est imposée sur le feutre par le poids du piston (15 kg). La contrainte totale minimum appliquée sur l'échantillon de feutre est alors de 13 kPa. Toutefois, la contrainte minimale imposée au cours des essais est de 0,3 MPa. Les données relatives à la rhéologie sont acquises pendant les mesures de perméabilité. Par conséquent, la pression hydraulique varie durant l'acquisition des données rhéologiques. La pression hydraulique maximale au cours des essais de compression est de 2 mCE soit environ 20 kPa de plus que la pression atmosphérique ambiante. Si l'on considère uniquement la compression de l'échantillon de feutre, la pression hydraulique est ainsi négligeable par rapport à la contrainte imposée.

Afin de choisir un feutre pour une section de presses, il est nécessaire de connaître sa déformation lors de sa compression. Quelques modèles parmi les travaux relatifs à la rhéologie des feutres cités dans le chapitre I vont être présentés ci-après. Généralement, l'épaisseur ou la porosité est reliée à la contrainte totale imposée afin d'étudier les propriétés rhéologiques des feutres humides. Tous les modèles présentés sont indépendants de la vitesse de compression.

Österberg (Österberg L. B. 1978) propose un modèle avec deux paramètres reliant la déformation à la contrainte totale (Équation III:4) pour des contraintes non nulles. La déformation est évaluée à partir de l'état déformé et de l'état au repos en début d'essai.

$$\sigma = A_o \cdot \left( \frac{e_o - e}{e - e_i} \right)^{B_o} \quad \text{Équation III:4}$$

avec  $\sigma$ , contrainte de compression  
 $e_o$ , l'épaisseur du feutre sans contrainte,  
 $(A_o, B_o)$ , paramètres expérimentaux.

Swain (Swain G. E. 1980) s'inspirant des travaux d'Österberg préfère utiliser une régression polynomiale pour modéliser ses résultats expérimentaux. L'ordre deux est suffisant pour obtenir une simulation correcte (Éq. III:5).

$$\sigma = A_o + A_1 \cdot \left( \frac{e_o - e}{e - e_i} \right) + A_2 \cdot \left( \frac{e_o - e}{e - e_i} \right)^2 \quad \text{Équation III:5}$$

avec  $A_o, A_1$  et  $A_2$ , paramètres.

Mettant en avant l'importance de la saturation pendant le pressage, Luciano (Luciano W. A. 1983) utilise le modèle d'Österberg pour relier la porosité à la contrainte afin de prédire la saturation du feutre lors du pressage (Éq. III:6) :

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_o}{A_L \sigma^{B_L} + 1} \quad \text{Équation III:6}$$

avec  $\varepsilon_o$  : porosité pour  $\sigma = 0$ ,  
 $A_L$  et  $B_L$  paramètres.

El Hosseiny propose un modèle reliant la contrainte structurale à la porosité (El Hosseiny F. 1990). Il montre par ses résultats expérimentaux que le comportement rhéologique du feutre n'est pas viscoélastique (Éq. III:7) :

$$\sigma = \left( \frac{1 - \varepsilon}{A_H \cdot (\varepsilon - \Delta)} + 1 \right)^{-B_H} \quad \text{Équation III:7}$$

avec  $\Delta$ , la déformation après 500 cycles de compression à 5 MPa.

Lopez (Lopez S. 1991) montre que la compressibilité des feutres dépend essentiellement du grammage total et de la constitution des voiles du feutre. Plus la compressibilité du feutre est faible, moins sa capacité alvéolaire perd de volume pendant la compression. Cependant, une compressibilité très faible correspondant à un feutre très rigide peut entraîner des problèmes de vibration.

Dans le cadre de cette thèse, les résultats concernant la compression des feutres présentent l'évolution de la porosité en fonction de la contrainte. Il sera ainsi possible d'utiliser directement les résultats de la rhéologie pour relier la perméabilité à la contrainte totale si nécessaire.

Considérant le modèle utilisé par Lopez, cette relation s'exprime alors en fonction de la porosité  $\varepsilon$  et de la contrainte  $\sigma$  sous la forme suivante (Éq. III:8) :

$$\varepsilon = 1 - A \cdot \sigma^B \quad \text{Équation III:8}$$

Ce modèle rhéologique est utilisé pour des contraintes comprises entre 0,5 MPa et 5 MPa correspondant à nos conditions expérimentales.

Les exemples de résultats présentés figures III-4 à III-6 sont les données acquises pendant les campagnes de mesures de perméabilité. Des résultats expérimentaux complémentaires concernant la rhéologie des feutres sont présentés dans l'annexe C. L'acquisition d'une valeur de perméabilité dure une demi-heure et le passage au point de déformation suivant prend environ 1 minute. Il est à noter que ces conditions de sollicitation sont très éloignées de celles rencontrées dans les pinces de presse ou dans les travaux sur la rhéologie des feutres (El Hosseiny F. 1990; Lopez S. 1991). Dans les conditions expérimentales de notre travail, les résultats montrent que le feutre se compacte peu après quelques cycles de compressions. Sur chaque figure, les résultats sont comparés avec le modèle empirique retenu (Éq. III:8).

En ce qui concerne les résultats présentés, le modèle est correct. Les paramètres issus des régressions ainsi que les coefficients de corrélation sont donnés après la présentation des mesures. Tous les résultats expérimentaux concernant chaque feutre testé sont regroupés dans l'annexe C. Deux exemples de régression sont présentés pour illustrer la validité du modèle. Le premier concerne le feutre A1 (fig. III-4) dont la porosité décroît de 0,47 à 0,27 lorsque la contrainte augmente de 0,37 à 4,66. Le coefficient de corrélation issu de la régression avec le modèle retenu est de 0,978. Le second exemple de régression concerne le feutre A221 (fig. III-5). Cet exemple est présenté pour illustrer le cas où le modèle est le plus éloigné des résultats expérimentaux. Dans ce cas le coefficient de régression est de 0,764.

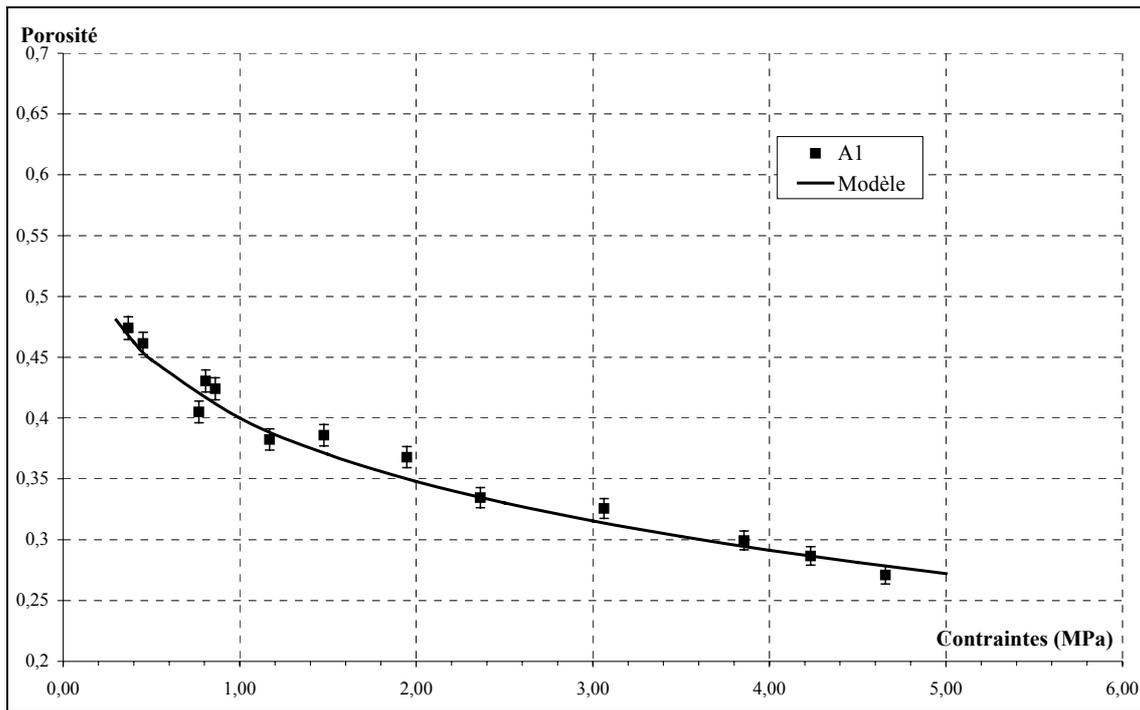


Figure III-4 : Évolution de la porosité du feutre A1 pendant sa compression

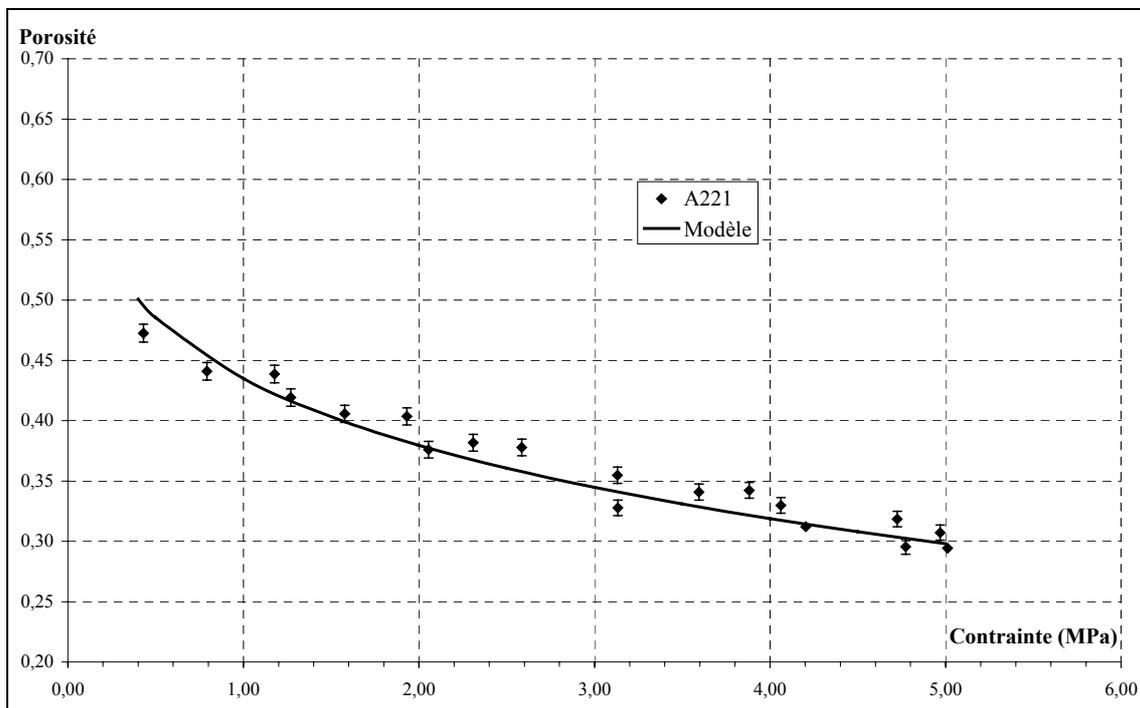


Figure III-5 : Évolution de la porosité du feutre A221 pendant sa compression

Les résultats concernant le feutre B1 issu des résidus de production montrent beaucoup plus de dispersion que dans le cas des autres feutres testés (fig III-6). Pour ce feutre, tous les résultats présentés proviennent de la compression de trois échantillons n'ayant jamais subi de sollicitations mécaniques. Cependant, l'essai série 2 (fig. III-6) représente l'application de deux cycles de compression - relaxation successifs sur un feutre vierge de toute sollicitation. Lors la seconde compression, la porosité mesurée est plus faible, à même contrainte, que pendant la compression initiale. Ce résultat prouve bien que le feutre s'est compacté.

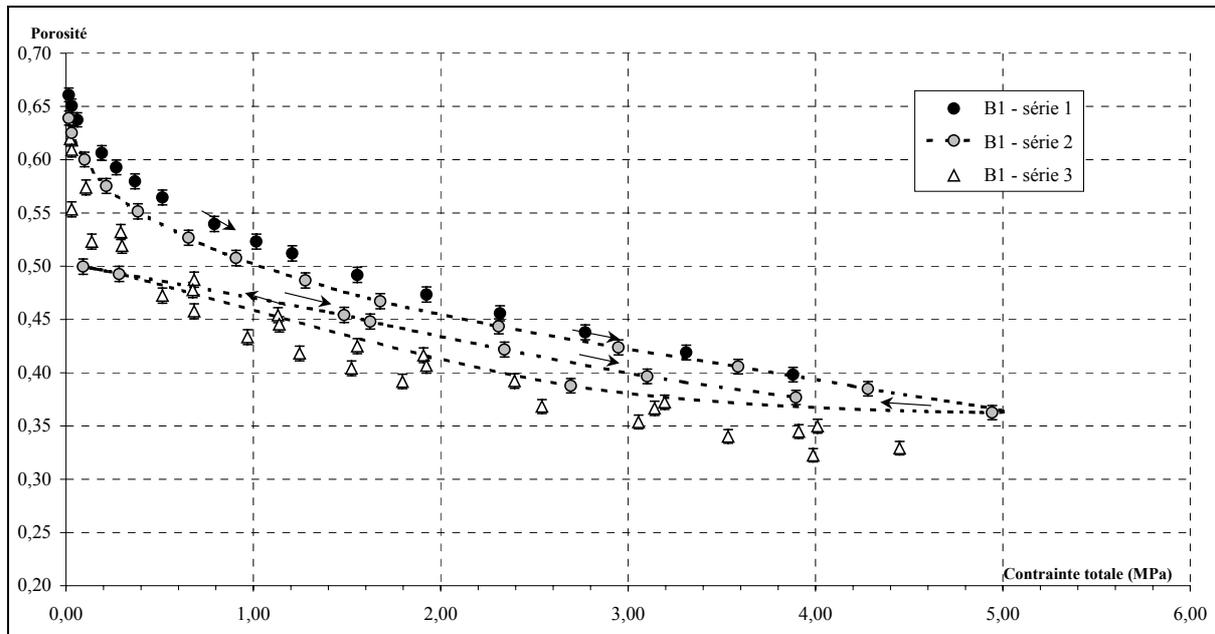


Figure III-6 : Évolution de la porosité du feutre B1 pendant sa compression pour trois essais sur des échantillons différents. Les essais sont nommés série 1, 2 et 3.

## 1.2 Comparaison.

Les résultats de mesures et de modélisations sont rassemblés dans les tableaux 2 et 3 ainsi que sur la figure III-7. Les feutres A1, A2 et A3 ont des comportements rhéologiques similaires, tant dans l'évolution de leur épaisseur, que dans l'évolution de leur porosité. Ceci est dû au fait que leur construction est identique, excepté dans la confection des voiles. Pour un grammage sensiblement identique, le feutre A4 montre un volume de vide plus important (tableau 2). Les feutres A221, B1 et B2 ont des grammages proches. Toutefois le feutre A221 montre un volume de vide plus faible tout au long de la compression. Les feutres A4 et A221 ont des comportements rhéologiques très proches (tableau 2) alors que leur grammage et leur conception sont très différents.

Le modèle proposé par l'équation III:8 représente correctement les résultats pour des compressions supérieures à 0,5 MPa. Le coefficient B (cf. Éq. III:8) caractérisant la compressibilité est du même ordre de grandeur que ceux obtenus par Chevallier (Chevallier P. 1988) tableau 3.

Feutre	1 MPa		3 MPa		5 MPa	
	Épaisseur (mm)	Porosité calculée d'après l'épaisseur	Épaisseur (mm)	Porosité calculée d'après l'épaisseur	Épaisseur (mm)	Porosité calculée d'après l'épaisseur
A1	1,80	0,40	1,58	0,32	1,48	0,27
A2	1,84	0,41	1,61	0,33	1,51	0,28
A3	1,80	0,41	1,58	0,33	1,48	0,28
A4	1,92	0,43	1,66	0,34	1,55	0,30
A221	2,41	0,44	2,07	0,34	1,94	0,30
A249	2,28	0,47	1,98	0,39	1,85	0,35
B1	2,93	0,53	2,42	0,42	2,20	0,36
B2	3,08	0,55	2,49	0,44	2,25	0,38

Tableau 2 : Récapitulatif des résultats concernant la rhéologie des feutres.

Feutre	A	B	R <sup>2</sup>
A1	0,60	0,182	0,978
A2	0,59	0,135	0,992
A3	0,59	0,15	0,946
A4	0,57	0,12	0,994
A221	0,565	0,12	0,764
A249	0,53	0,12	0,996
B1	0,475	0,13	0,952
B2	0,455	0,195	0,999

Tableau 3 : Résultats des régressions associées au modèle utilisé. A et B sont les paramètres du modèle (Éq. III:8). R<sup>2</sup> est le coefficient de corrélation issu de la comparaison du modèle avec les données expérimentales.

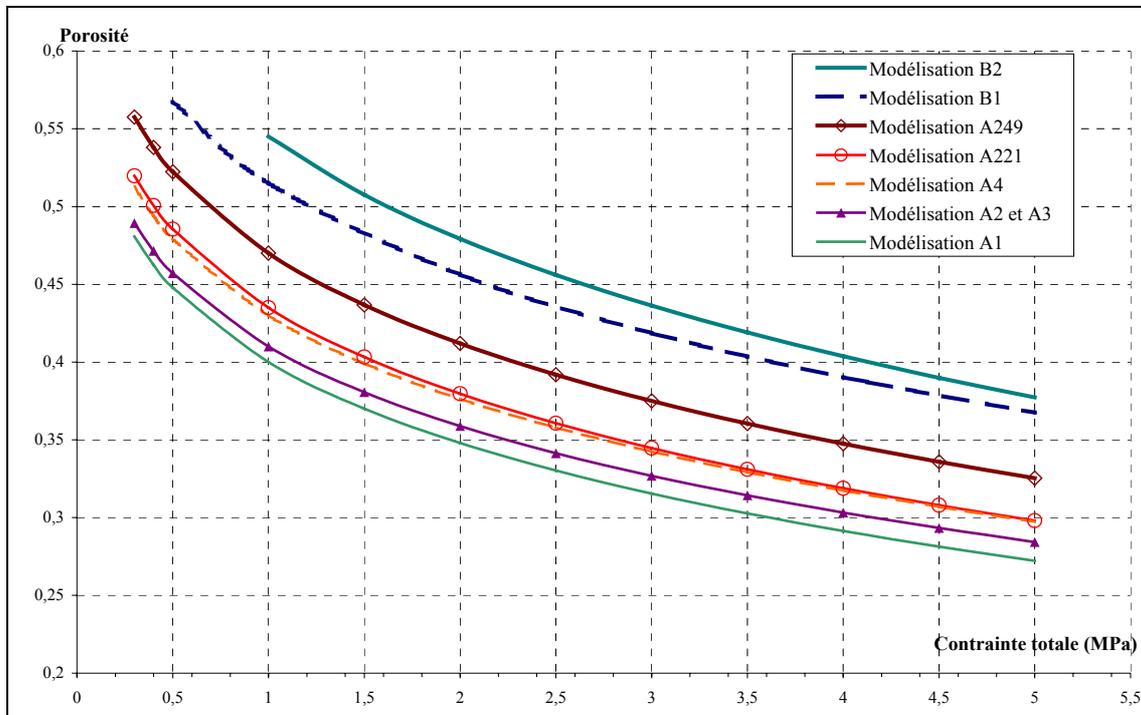


Figure III-7 : Comparaison des résultats de modélisation.

Quel que soit le niveau de compression, les feutres avec un canevas double ont une porosité supérieure ou égale à celles des feutres avec un canevas simple. La comparaison des résultats de modélisation montre que les feutres A4 et A221 possèdent un comportement similaire : leur porosité diminue de façon identique avec la compression. Le classement des feutres par rapport à leur porosité reste le même tout au long de la compression. Cette conclusion est propre à notre étude, il est possible de trouver des contre-exemples dans la littérature en particulier dans (Swain G. E. 1980).

Afin d'étudier l'influence de la conception du feutre sur sa rhéologie, le grammage total et le grammage de voile sont corrélés aux paramètres du modèle rhéologique (fig. III-8). Les résultats (fig. III-8 c et d) de cette étude semblent montrer que ni la quantité massique de voile, ni le grammage total du feutre n'ont d'influence sur le coefficient B ou coefficient de compressibilité (Éq. III:4). Ceci va à l'encontre des conclusions de Lopez (Lopez S. 1991).

Le coefficient A (Éq. III:4) correspond à la quantité volumique de matière pour une compression de 1 MPa. Le résultat de la corrélation entre A et le grammage total (fig III-8 a) des feutres montre que ceux dont le grammage total est plus élevé ont tendance à avoir une épaisseur plus importante sous une compression de 1 MPa. La corrélation du coefficient A avec le pourcentage massique de voile (fig. III-8 b) montre que lorsque la proportion de voile dans la construction du feutre augmente, la porosité du feutre sous 1 MPa diminue.

L'étude rhéologique des feutres permet de comparer l'évolution de leur capacité alvéolaire lors de leur compression. Il est alors possible de sélectionner un feutre en fonction de la capacité alvéolaire qu'il aura dans la pince de la presse.

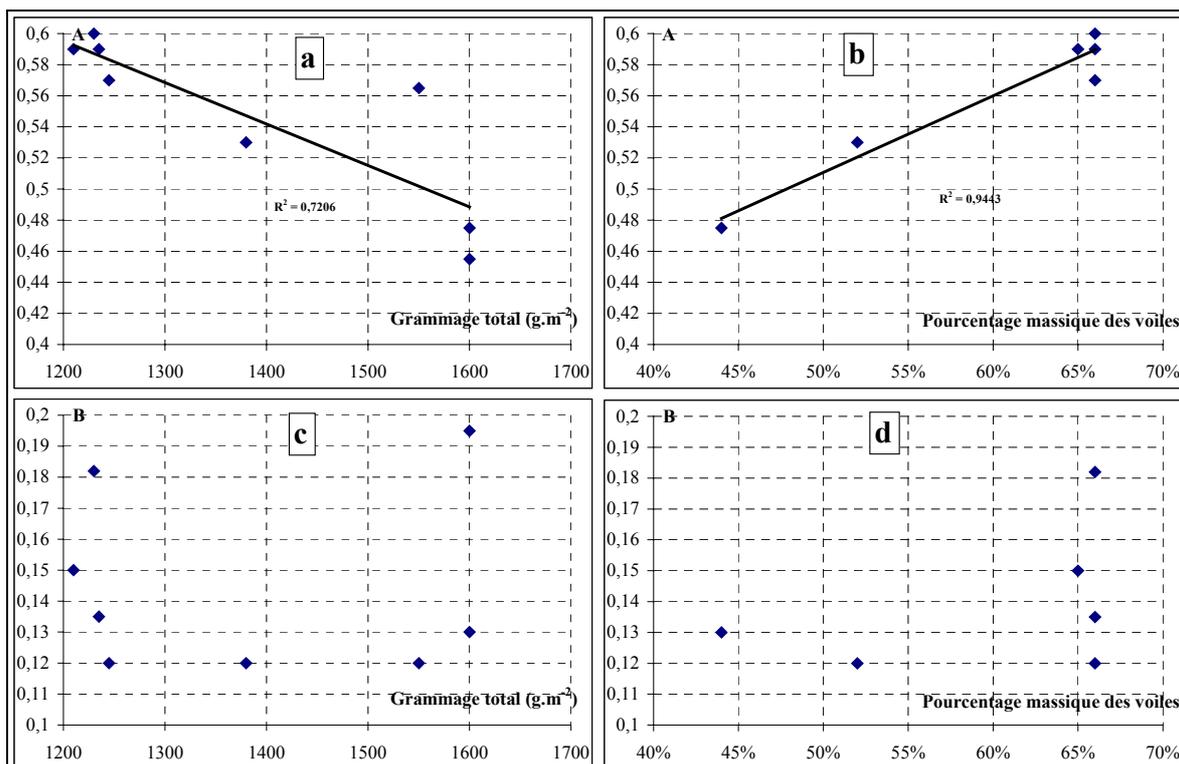


Figure III-8 : Corrélation entre les paramètres du modèle et les paramètres de construction des feutres

## III.2 Influence de la compression sur le tenseur des perméabilités.

### 2.1 Mesure de la perméabilité transversale.

#### 2.1.a Mesures réalisées sur un perméamètre à air.

Afin de valider les mesures de perméabilité faite avec l'appareil expérimental conçu dans le cadre de cette thèse, des mesures de perméabilité sur un perméamètre à air sont réalisées à l'École Nationale Supérieure de l'Industrie du Textile de Mulhouse (ENSTIM) (fig. III-9). Ce perméamètre à air est le FX3300, fabriqué par la société Textest.

Une dépression de 195 Pa est imposée de part et d'autre l'échantillon de 100 cm<sup>2</sup> de feutre (la pression moyenne est à 1 atm environ). Puis, le débit d'air traversant l'échantillon est mesuré lorsque l'écoulement devient stationnaire. Comme un écoulement dans le plan (fuite) peut exister, une mesure de débit avec la même dépression est réalisée en empêchant l'écoulement transversal. Cette mesure permet d'estimer le débit de fuite latérale. La température de la salle étant réglée à 20°C, la viscosité est prise égale à  $1,5 \cdot 10^{-5}$  Pa.s. Afin d'évaluer la perméabilité, l'épaisseur « sans contrainte » du feutre est mesurée entre un capteur de proximité et une cible métallique sous une pression de 530 Pa. La porosité est ensuite évaluée à partir du grammage du feutre et de l'épaisseur en utilisant l'équation III:1.

Pour s'affranchir des effets de Klinkenberg pouvant apparaître pour de faibles pressions, ou d'éventuelles non-linéarités dans la relation débit-dépression, des mesures de perméabilité ont été réalisées pour plusieurs dépressions (fig. III-10). Les résultats de ces mesures montrent que la relation entre débit et dépression est bien linéaire. Par conséquent la loi de Darcy s'applique.

Les mesures de perméabilité sur différents feutres sont présentées dans le tableau 4 et figure III-11. Ces mesures confortent l'hypothèse faite dans le paragraphe précédent concernant le classement des feutres vis à vis de leur porosité, i.e. les feutres sont classés dans le même ordre que précédemment.

La correction des valeurs de perméabilité transversale est faite en diminuant le débit transversal par le débit de fuite estimé. Cette correction n'est pas significative (fig. III-11).



Figure III-9 : Photographie du FX3300, perméamètre à air.

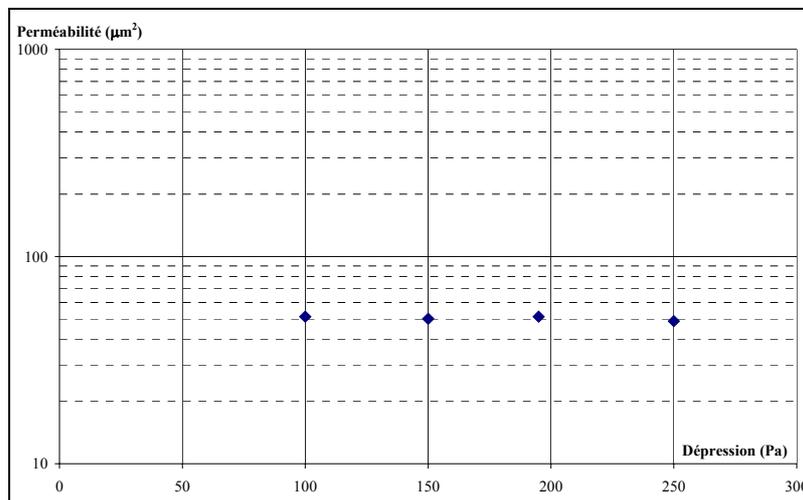


Figure III-10 : Évolution de la perméabilité à l'air d'un feutre avec la dépression.

Nom du feutre	Épaisseur « sans contrainte » (mm)	Porosité calculée
A2	3,23	0,66
A3	3,28	0,67
A4	3,44	0,68
A249	4,735	0,74
B1	4,74	0,77
B2	5,23	0,79

Tableau 4 : Résultat de mesure de l'épaisseur « sans contrainte ».

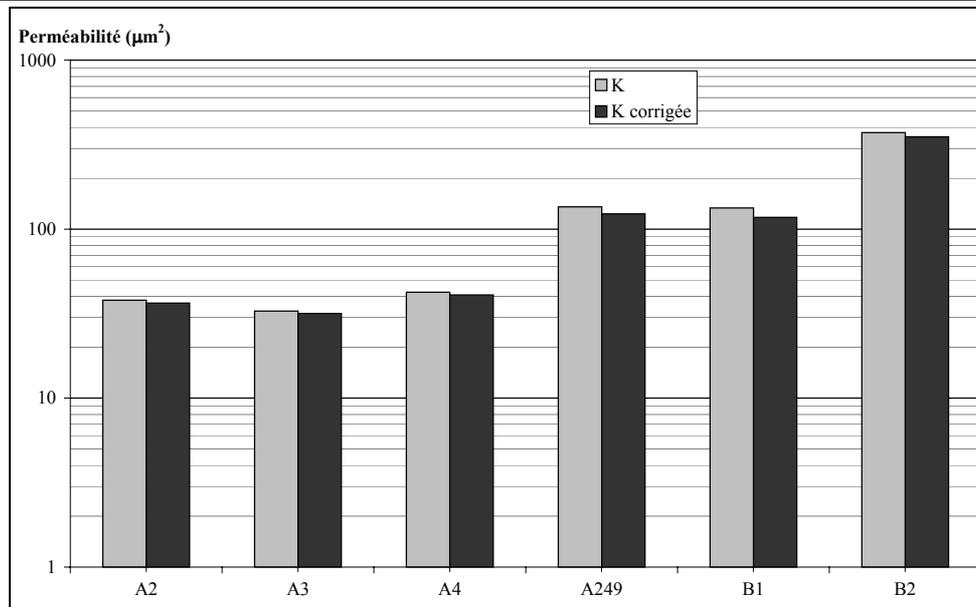


Figure III-11 : Perméabilité à l'air de quelques feutres.

Nom du feutre	Porosité du feutre lors de la mesure	Perméabilité mesuré ( $\mu\text{m}^2$ )
A2	0,66	37
A3	0,67	32
A4	0,68	41
A249	0,74	128
B1	0,77	118
B2	0,79	352

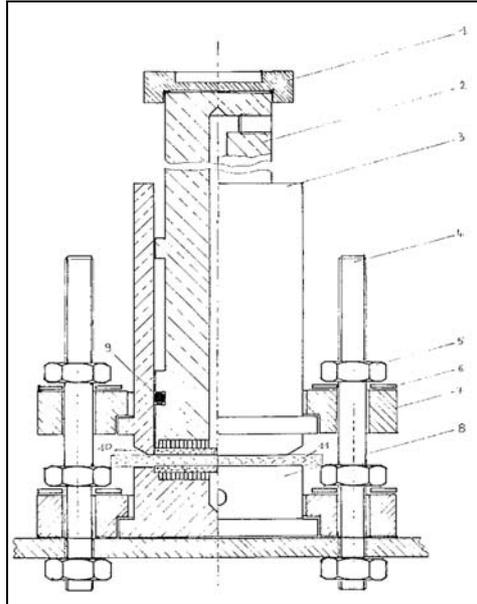
Tableau 5 : Récapitulatif des résultats de mesure de perméabilité à l'air sur différents feutres.

Pour les feutres présentés, la perméabilité augmente avec la porosité (tableau 5) et diminue lorsque le pourcentage massique de voile dans le feutre augmente (tableau 1). Les feutres A2, A3 et A4 d'une part et A249 et B1 d'autre part présentent des perméabilités très proches. Les feutres avec un canevas double (A249, B1, B2) présentent une perméabilité plus importante que les feutres avec un canevas (A2, A3, A4). La comparaison des résultats concernant les feutres B1 et B2 montre qu'à grammage égal, la perméabilité peut être différente car elle est influencée par la structure du feutre (différence de structure représentée par la différence d'épaisseur).

2.1.b Mesures réalisées avec le perméamètre transversal de Chevallier.

Conçu par Chevallier dans le cadre de sa thèse (Chevallier P. 1988), le perméamètre transversal (fig. III-13) est encore utilisé aujourd'hui dans la société Voith Fabrics à Annonay (Ardèche - France) pour mesurer la perméabilité des feutres.

Ce perméamètre permet d'obtenir des valeurs de résistance à l'écoulement de l'eau sous différentes sollicitations du feutre (en compression ou en tension). La cellule a un diamètre de 6 cm. La conception du perméamètre transversal est similaire au nouvel appareil décrit dans le chapitre II. Cependant, une étanchéité est faite dans le plan du feutre (fig. III-12).



**Figure III-12 : Plan du perméamètre de Chevallier. L'étanchéité du feutre est obtenue par le serrage de quatre goujons (repère 4).**

Pour obtenir une déformation du feutre la plus uniforme possible, l'axe du piston doit être orthogonal au plan du feutre. Ainsi, le serrage créant l'étanchéité de la cellule doit être réparti le plus uniformément possible sur le collier de serrage (Repère 7 fig. III-12).

À l'issue d'un séjour dans la société Voith Fabrics, des mesures de perméabilité transversale ont été effectuées sur le feutre B1 pour différents niveaux de compression. Ces mesures sont alors comparées aux résultats préliminaires issus du nouvel appareil (fig. III-14). Les mesures issues des deux appareils sont très proches. Ces résultats valident d'une part le fonctionnement du nouvel appareil, et d'autre, part ses mesures.

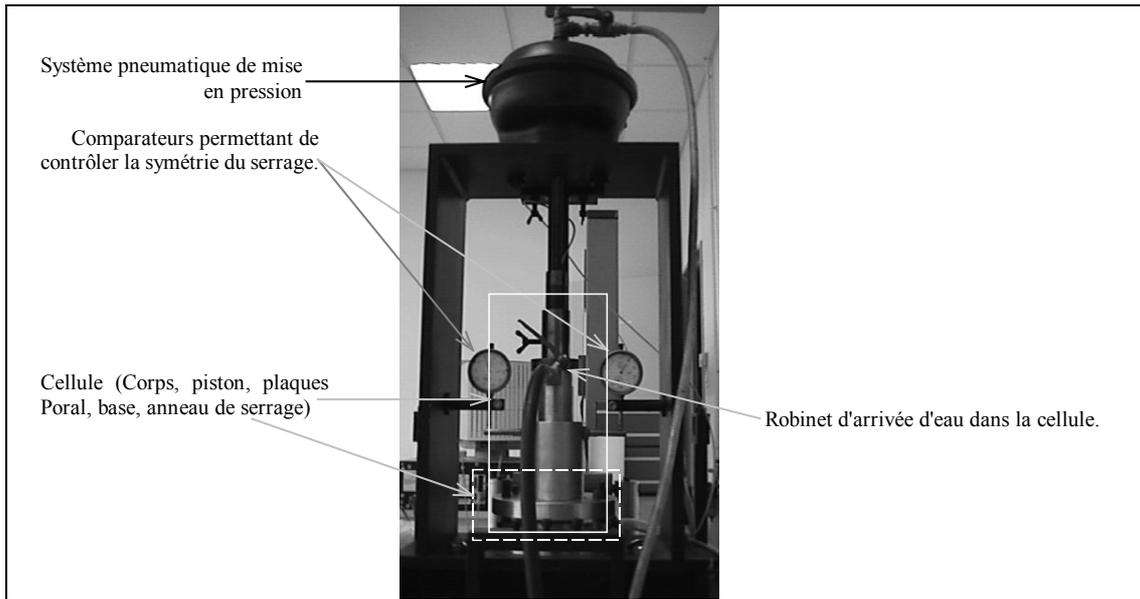


Figure III-13 : Photographie illustrant le perméamètre de Chevallier.

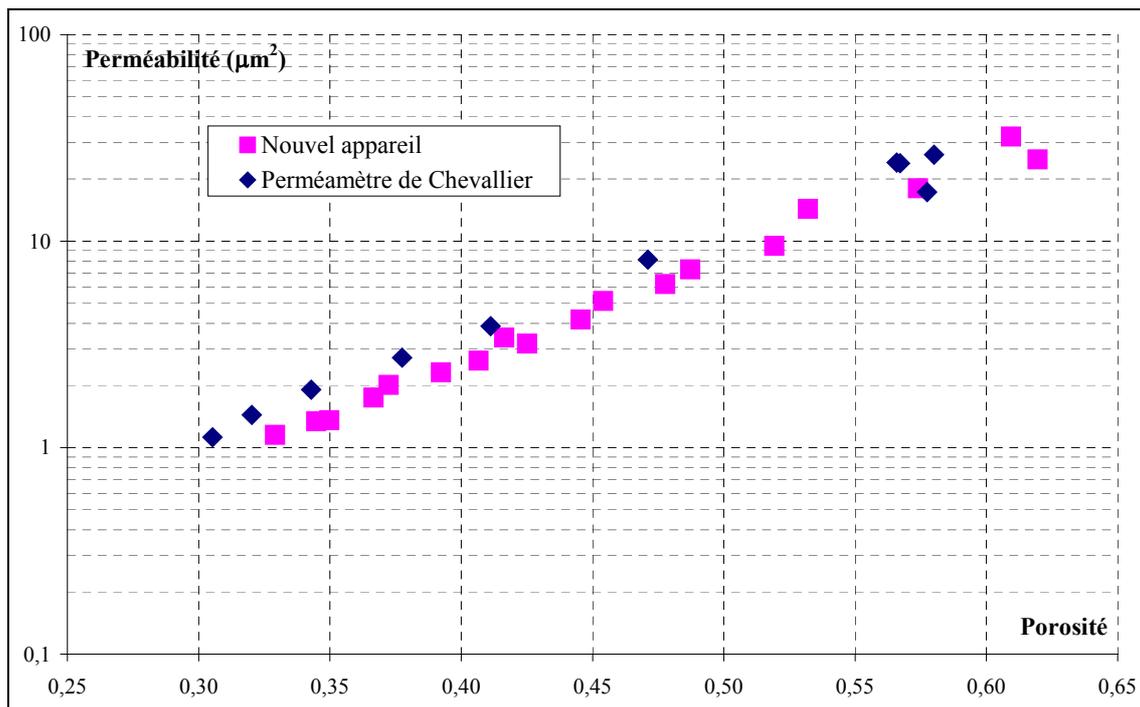


Figure III-14 : Comparaison des résultats des mesures sur le feutre B1 avec le nouvel appareil et le perméamètre de Chevallier.

*2.1.c Mesures réalisées avec le nouvel appareil.*

La procédure de mesure ainsi que l'évaluation de la perméabilité à partir des grandeurs mesurées ont été décrites dans le chapitre précédent. À partir des relations présentées dans le chapitre II (paragraphe 3.3.c), un programme a été conçu afin de calculer toutes les grandeurs utiles ainsi que l'erreur commise.

En considérant tous les essais présentés dans ce paragraphe, la contrainte est comprise dans l'intervalle de 0,5 MPa à 6 MPa. Ceci correspond bien au niveau de contrainte pouvant exister dans la pince d'une presse. Tout essai confondu, l'intervalle de porosité s'étend de 0,63 à 0,29 et l'intervalle de perméabilité transversale s'étend de 20 à  $0,2 \mu\text{m}^2$ . Pour un feutre donné, l'intervalle de porosité dépend de la rhéologie du feutre.

Sur chaque figure, les points expérimentaux ont été représentés ainsi que de leur domaine d'incertitude. Deux modèles empiriques, le modèle de Kozeny-Carman et un modèle exponentiel complètent les graphiques. Ces modèles ainsi que les paramètres utilisés sont décrits dans le paragraphe 2.2 dédié à la modélisation.

Pour ne pas surcharger les figures, la comparaison entre les mesures de perméabilité utilisant comme fluide de l'air ou de l'eau sera présentée dans la partie relative à la modélisation. Dans un premier temps, les données sont analysées pour chaque feutre puis sont comparées dans le paragraphe relatif à la modélisation

La perméabilité transversale du feutre A1 (fig. III-15) diminue d'un ordre de magnitude ( $3$  à  $0,2 \mu\text{m}^2$ ) lorsque la porosité décroît de 0,46 à 0,27.

Contrairement au feutre précédent, la perméabilité du feutre A221 (fig. III-16) reste sensiblement constante tout au long de sa compression. Cependant, il est à noter une dispersion relativement importante des points de mesures. De même pour les feutres A249 et B2 (fig. III-17 et III-18) la diminution de la perméabilité est inférieure à un ordre de grandeur.

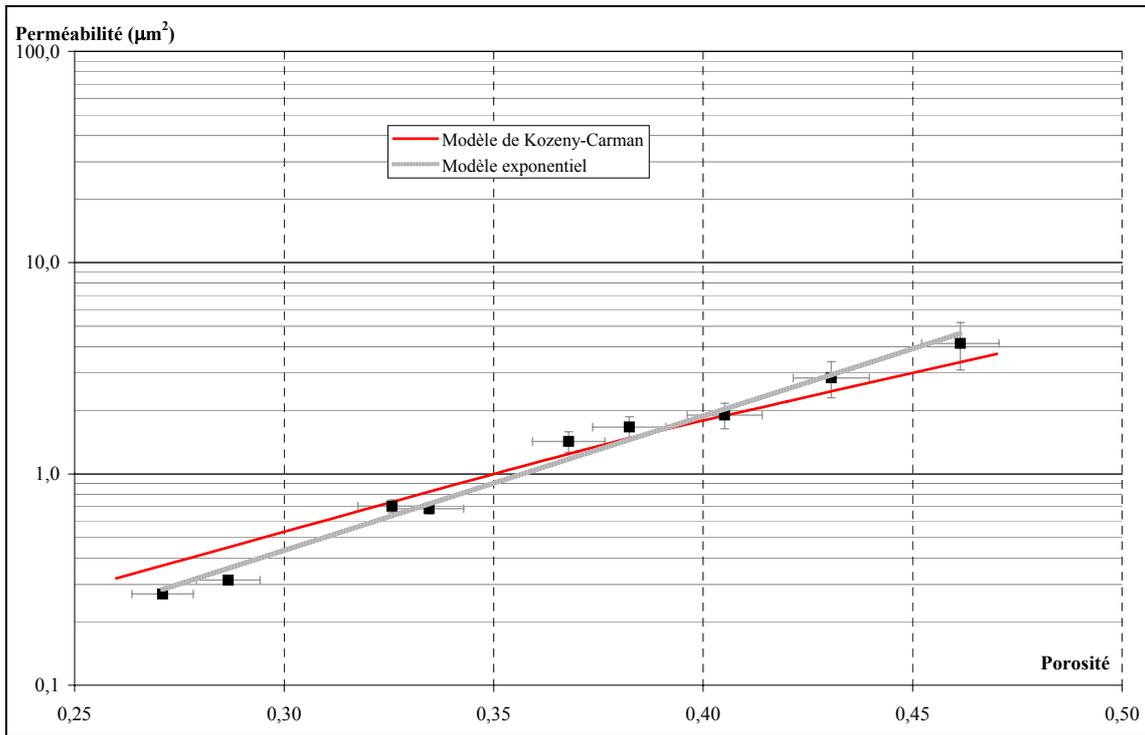


Figure III-15 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre A1 lors de sa compression.

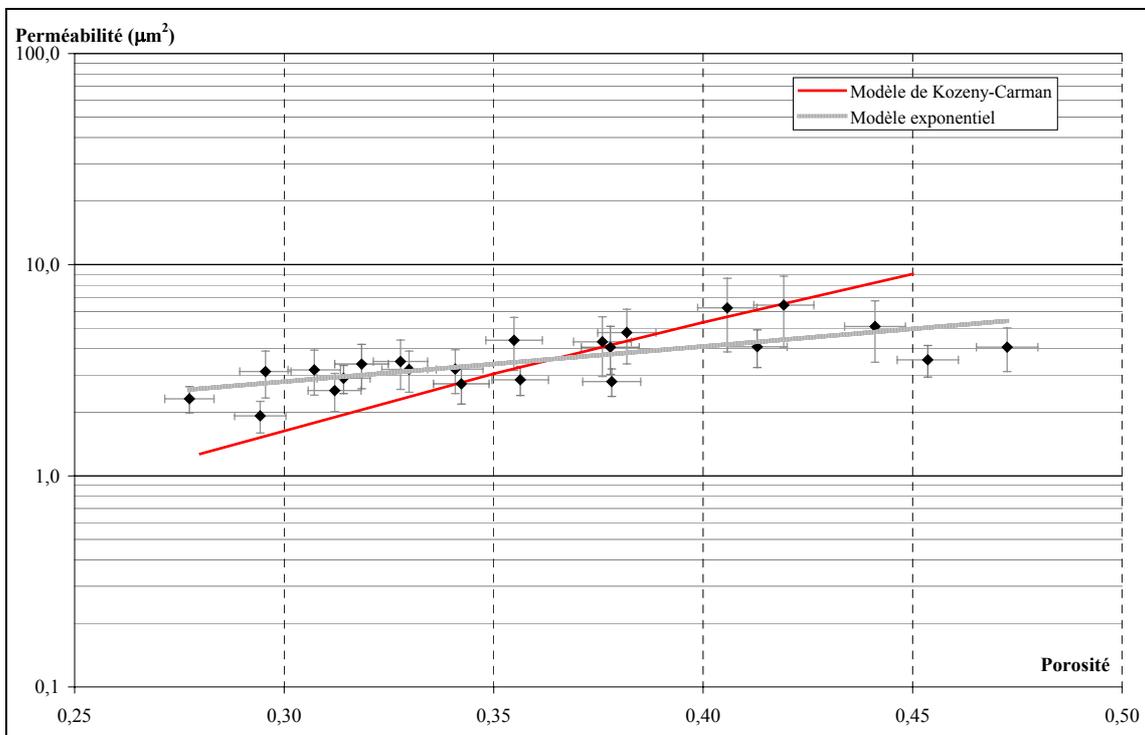


Figure III-16 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre A221 lors de sa compression.

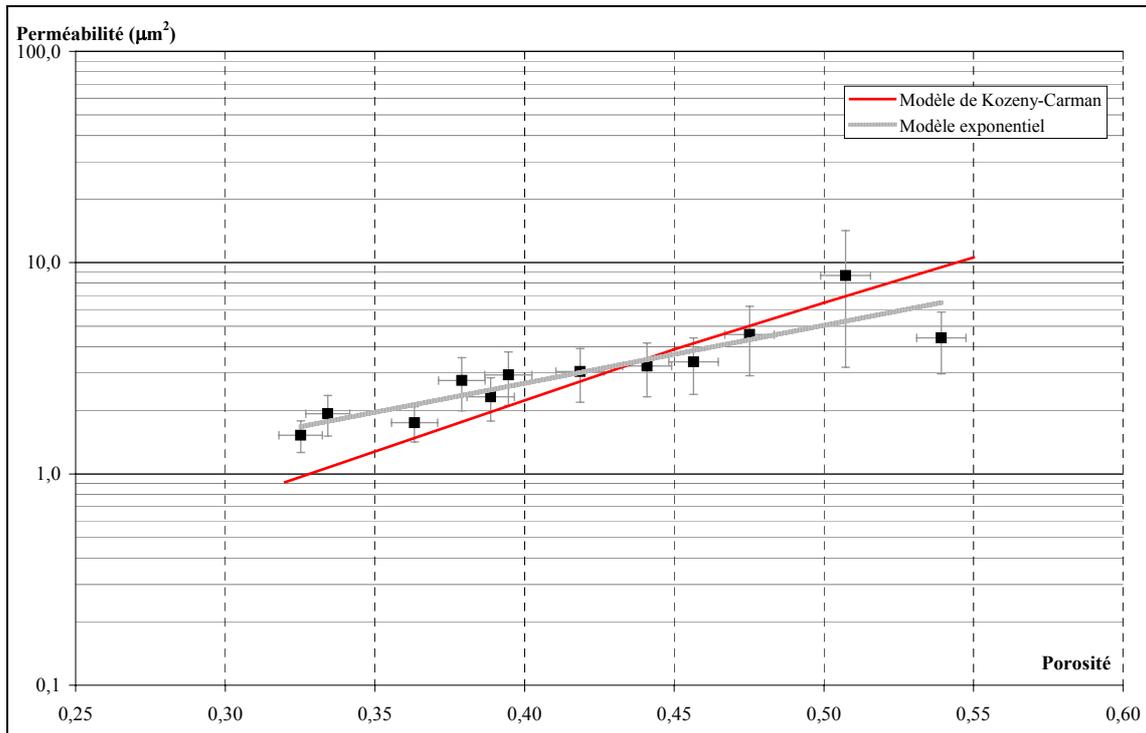


Figure III-17 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre A249 lors de sa compression.

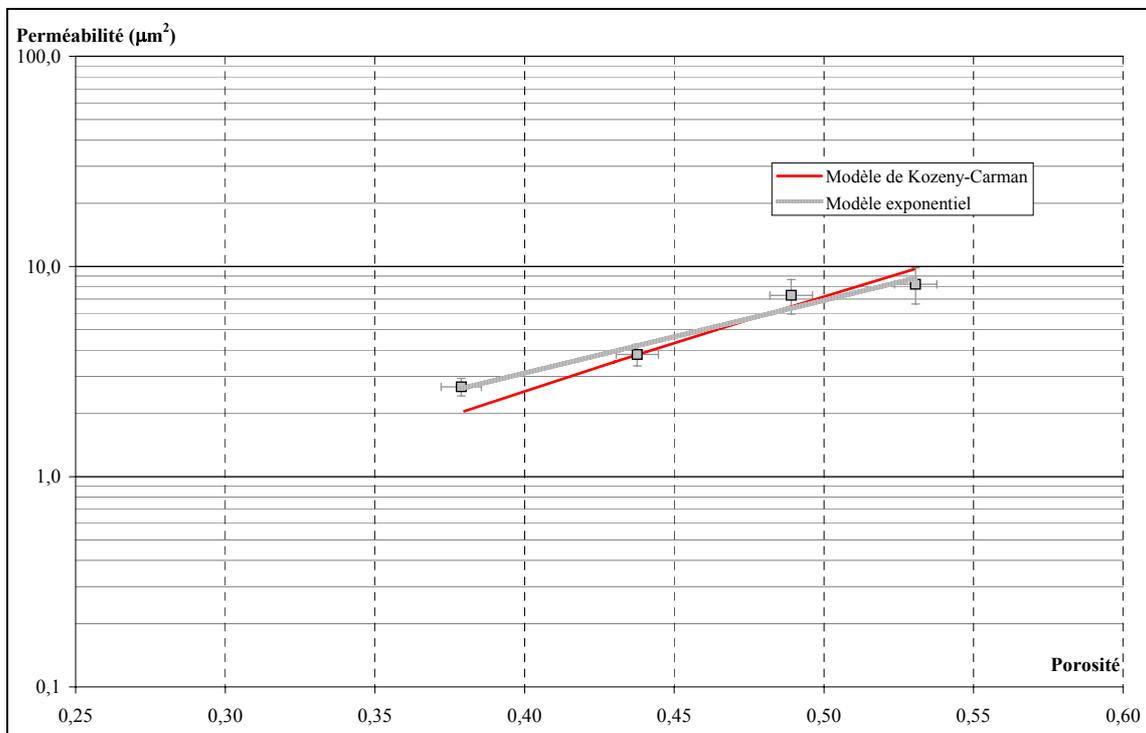


Figure III-18 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre B2 lors de sa compression.

Lors de l'essai série 1 concernant le feutre B1 (fig. III-19), de l'air est rentré dans le circuit d'écoulement d'eau. La perméabilité mesurée lors de cet essai est alors plus faible que dans les séries 2 et 3 mais rejoint les autres courbes lorsque que la compression devient plus importante (fig. III-19). Si la série 3 montre une dispersion des résultats rhéologiques relativement plus importante que les autres essais (fig. III-6), les résultats concernant la perméabilité sont plus groupés montrant deux comportements bien distincts attribués aux dispersions dans la fabrication du feutre. L'essai nommé série 2 correspond à l'essai où deux compressions successives ont été appliquées sur le feutre (fig. III-6). Les résultats concernant la perméabilité montrent que, si la rhéologie du feutre change la structure conserve les mêmes propriétés de résistance à l'écoulement pour des niveaux de déformation équivalent. Il en est de même pour tous les feutres testés car les échantillons sont utilisés plusieurs fois pour les mesures de perméabilité transversale (et longitudinale).

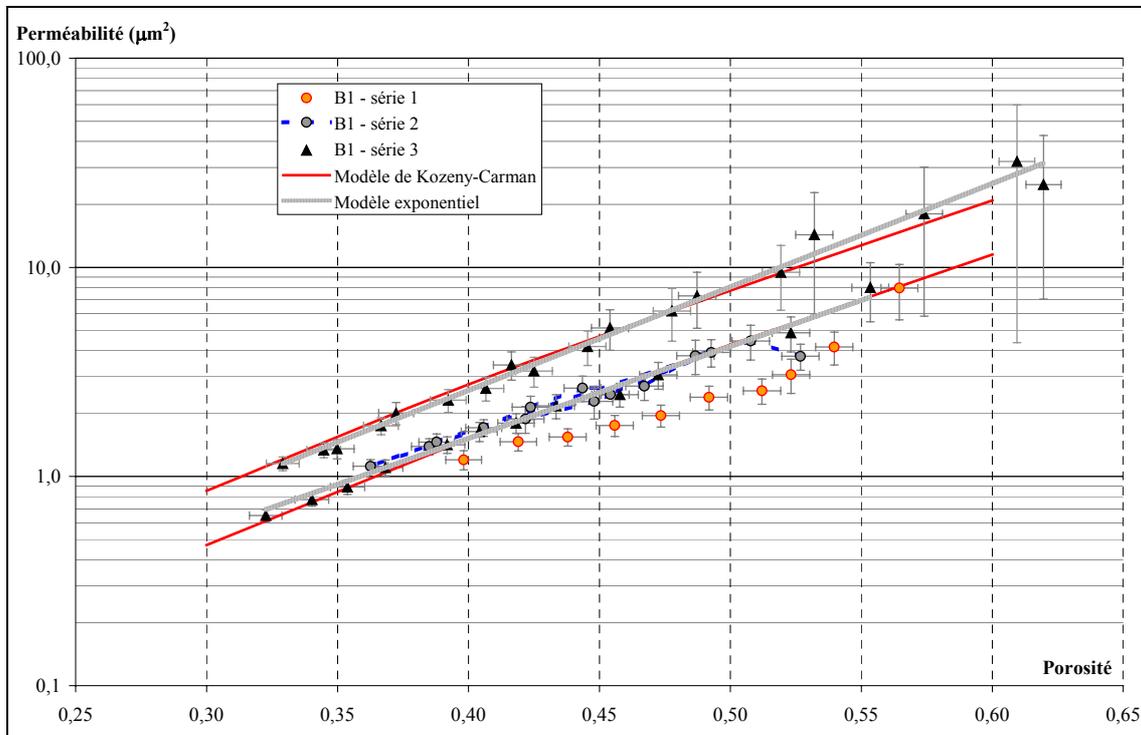


Figure III-19 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre B1 lors de sa compression.

## 2.2 Modélisation de la résistance à l'écoulement.

### 2.2.a Choix des modèles.

La perméabilité dépend uniquement de la structure du feutre. Pour caractériser cette structure la porosité ainsi que la surface spécifique sont couramment utilisées. La porosité représente l'aptitude du feutre à accueillir de l'eau. L'écoulement à travers les milieux poreux a fait l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales (Carman P. C. 1937 ; Han S. T. 1969 ; Koltodziej J. A., Dziecielak R. & al. 1998 ; Kyan C. P. 1970; Lawrence C. A. et Shen X. 2000 ; Rahli O., Tadrict L. & al. 1995 ; Zhu S., Pelton R. H. & al. 1995 ). Lors de sa modélisation, la perméabilité est souvent reliée à la porosité et aux diamètres des fibres. Pour évaluer la perméabilité dans les milieux fibreux deux approches distinctes sont proposées dans la littérature :

- ⊗ modéliser l'écoulement dans des capillaires tortueux,
- ⊗ modéliser l'écoulement autour d'obstacles.

Considérant la première approche, les travaux de Kozeny et Carman (Carman P. C. 1937) sont très souvent utilisés pour modéliser l'écoulement dans les feutres de papeterie. Kozeny et Carman, s'inspirant des travaux de Poiseuille, relie la perméabilité à des paramètres structuraux (équation n°III:9).

$$K = \frac{\varepsilon^3}{k_o \cdot \xi^2 \cdot S_v^2} \quad \text{Équation III:9}$$

avec :  $k_o$ , une constante,  
 $\varepsilon$ , la porosité,  
 $S_v$ , la surface spécifique volumique du réseau poreux,  
 $\xi$ , la tortuosité (rapport de la distance effective parcourue par le fluide par la distance parcourue réellement dans la matrice poreuse).

Ce modèle est souvent employé lors de problème d'écoulement dans les milieux poreux comme dans le cas du passage. En effet, les paramètres employés sont directement liés aux propriétés des matériaux. Cependant d'autres modèles empiriques existent concernant les milieux tissés, une synthèse de ces travaux est réalisée dans (Han S. T. 1969 ; Koltodziej J. A., Dziecielak R. & al. 1998 ; Lawrence C. A. et Shen X. 2000; Rahli O., Tadrict L. & al. 1995 ; Zhu S., Pelton R. H. & al. 1995 ). Nous présentons ci-après quelques exemples de modèles issus de ces synthèses.

Davies (1952) propose une relation entre la constante de Kozeny-Carman,  $k_o$  et la porosité pour des milieux fibreux :

$$k_o = k_1 \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^{1/2}} [1 + k_2 (1-\varepsilon)^3] \quad \text{Équation III:10}$$

Évaluant la perméabilité à l'air de filtres de fibres non rigides, il obtient comme valeurs des paramètres  $k_1$  et  $k_2$ , 4 et 56. Ingmanson (Ingmanson W. L., Andrew B. D. & al. 1959) mesurant la perméabilité à l'eau d'assemblage de fibres de verre et de nylon orthogonales au flux propose des valeurs de  $k_1$  et  $k_2$  sensiblement différentes : 3,5 et 57.

Jackson et James (1986) proposent une relation entre la perméabilité, la porosité et le diamètre des fibres :

$$\frac{K}{d^2} = \frac{3}{5} (-\ln(1-\varepsilon) - 0.931 + o(\ln(1-\varepsilon)^{-1})) \quad \text{Équation III:11}$$

avec :  $d$ , le diamètre des fibres du milieu poreux  
 $o(f(x))$ , un résidu inférieur à  $f(x)$ .

Modélisant l'écoulement à travers un réseau de cylindres, Happel et Brenner (1959) proposent deux relations pour  $k_o$  : une, dans le cas où l'écoulement est parallèle aux cylindres (Équation III:12), une autre, si l'écoulement est perpendiculaire aux cylindres (Équation III:13).

$$k_o = \frac{2\varepsilon^3}{(1-\varepsilon) [-2\ln(1-\varepsilon) - 3 + 4(1-\varepsilon) - (1-\varepsilon)^2]} \quad \text{Équation III:12}$$

$$k_o = \frac{2\varepsilon^3}{(1-\varepsilon) \left[ -\ln(1-\varepsilon) - \frac{1-(1-\varepsilon)^2}{1+(1-\varepsilon)^2} \right]} \quad \text{Équation III:13}$$

La seconde approche pour évaluer la perméabilité des milieux fibreux est de modéliser l'écoulement autour d'obstacles. Kyan (Kyan C. P. 1970) postule que la perte de charge totale d'un milieu poreux fibreux est la somme de la perte de charge due à la viscosité, à la force de traînée et aux déformations par flexion des fibres. Il propose alors une corrélation donnant le paramètre  $k_o$  en fonction de la porosité du milieu et du nombre de pores effectifs  $Ne$ .  $Ne$  est défini par :

$$Ne = \sqrt{\frac{\pi}{(1-\varepsilon)\sin\alpha}} - 2,5 \quad \text{Équation III:14}$$

où :  $\alpha$  est l'angle d'inclinaison entre deux fibres adjacentes.

L'auteur conseille de prendre  $\alpha$  égal à  $30^\circ$ . Le modèle proposé est alors :

$$k_o = \frac{[62,3Ne^2(1-\varepsilon) + 107,4]\varepsilon^3}{16Ne^6(1-\varepsilon)^4} \quad \text{Équation III:15}$$

Mao et Russell (Mao N. et Russel S. J. 2000-2000) évaluent la résistance offerte par une fibre à l'aide des relations de Happel et Brenner. Ils calculent ensuite la dégradation d'énergie

de toute la structure fibreuse aboutissant ainsi à la perméabilité directionnelle de toute la structure. Comme pour le modèle de Kyan, l'utilisation de cette relation nécessite la connaissance de l'orientation des fibres du milieu. Ne connaissant pas ce paramètre, nous ne pourrions utiliser ces modèles.

Dans le cadre de notre étude, nous utiliserons la loi de Kozeny Carman. Nous avons retenu cette loi car elle est utilisée dans la plus part des modèles du pressage du papier. Nous ferons l'hypothèse que la surface volumique du réseau poreux est reliée à la surface volumique des matériaux par la relation suivante :

$$S_v = S_o(1 - \varepsilon) \quad \text{Équation III:16}$$

où :  $S_o$  est la surface spécifique volumique des constituants.

Un unique paramètre peut être utilisé évitant ainsi d'évaluer la surface spécifique volumique ainsi que la tortuosité. Ce paramètre est le produit  $(k_o \xi^2 S_o^2)$ . Ce terme a la dimension de l'inverse d'une perméabilité ( $m^{-2}$ ).

La tortuosité n'étant pas mesurable directement mais peut être estimée en utilisant les propriétés de conductibilité ( $\sigma_r$ ) du milieu saturé et la conductibilité du fluide saturant ( $\sigma_f$ ) (Oger L., Gauthier C. & al. 1989) (cf. Éq. III:17). La tortuosité est alors reliée à la porosité par une relation phénoménologique définie expérimentalement. Dans ces conditions, la loi de Kozeny-Carman perd son sens physique pour devenir un modèle empirique à plusieurs paramètres.

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_r} = \frac{\tau}{\varepsilon} \quad \text{Équation III:17}$$

Nous préférons alors utiliser directement une relation phénoménologique pour relier la perméabilité à la porosité du feutre. Cette relation est identique à celle utilisée dans les travaux de Rhali (Rahli O., Tadrist L. & al. 1995) et de Young et Wu (Young W.-B. et Wu F. 1995). Ce modèle simple repose sur une loi exponentielle avec deux paramètres :

$$K = \Lambda \cdot 10^{\psi \cdot \varepsilon} \quad \text{Équation III:18}$$

$\Lambda$  a la dimension d'une perméabilité.  $\psi$  est sans dimension. Ce modèle est limité au domaine de porosité de notre étude. Les deux paramètres sont évalués à partir des résultats expérimentaux.

L'évaluation des paramètres des deux lois retenues permettra de construire une base de données concernant le comportement de la perméabilité des feutres. Cette base de données sera alors utilisée pour modéliser le pressage du papier (Gustafsson J.-E. et Kaul V. 2001).

## 2.2.b Application des modèles retenus.

Les résultats de régression des deux modèles précédemment décrits sont portés sur chaque graphique illustrant les résultats des mesures de perméabilité transversale (fig. III-15 à III-19). Les valeurs numériques de chaque paramètre sont reportées dans le tableau. Les meilleurs résultats sont obtenus avec le modèle exponentiel.

Feutre	Régression Kozeny-Carman	R <sup>2</sup>	Régression modèle exponentiel	R <sup>2</sup>	Domaine de porosité
A1	$\frac{11,5 \cdot \varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$	0,866	$0,0054 \cdot 10^{6,362 \cdot \varepsilon}$	0,985	$0,27 \leq \varepsilon \leq 0,46$
A221	$\frac{30,0 \cdot \varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$	0,325	$0,883 \cdot 10^{1,667 \cdot \varepsilon}$	0,483	$0,28 \leq \varepsilon \leq 0,47$
A249	$\frac{12,9 \cdot \varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$	0,585	$0,215 \cdot 10^{2,743 \cdot \varepsilon}$	0,791	$0,33 \leq \varepsilon \leq 0,54$
B1	$\frac{8,53 \cdot \varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$	0,851	$0,0264 \cdot 10^{4,400 \cdot \varepsilon}$	0,987,	$0,32 \leq \varepsilon \leq 0,62$
B2	$\frac{14,37 \cdot \varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$	0,902	$0,128 \cdot 10^{3,460 \cdot \varepsilon}$	0,960	$0,38 \leq \varepsilon \leq 0,53$

**Tableau 6 : Simulation des résultats expérimentaux concernant la perméabilité transversale avec la loi de Kozeny-Carman et une loi exponentielle. R<sup>2</sup> est le coefficient de corrélation. La dernière colonne correspond au domaine de porosité des données expérimentales.**

Aucune corrélation entre les paramètres des modèles utilisés et les paramètres de fabrication regroupés dans le tableau 1 n'a pu être mise en évidence. Le modèle exponentiel permet de caractériser assez bien l'évolution de la perméabilité transversale de tous les feutres. Les modèles exponentiels de tous les feutres sont représentés sur un même graphique (fig. III-20) afin de comparer l'influence des déformations des différentes structures sur la perméabilité.

La comparaison directe des mesures de perméabilité à l'air avec les résultats de perméabilité à l'eau n'est pas possible car les états de déformation des feutres sont trop différents. Cependant le feutre B2 est plus perméable que les feutres A249 et B1 (fig. III-20) comme indiqué par les mesures de perméabilité transversale à l'air. Les feutres B1 et A249 ont des perméabilités très différentes lorsque la porosité diminue, alors que leur perméabilité à l'air était similaire. Le feutre A1 (qui a un comportement de perméabilité similaire aux feutres A2, A3 et A4) (cf. fig. III-32) montre une perméabilité proche de celle de A249 pour une porosité d'environ 0,45 alors que leurs perméabilités à l'air étaient très différentes. Par ailleurs, B1 a une perméabilité plus faible que celle du feutre A1. Ceci n'était pas prévisible de part les mesures de perméabilité à l'air seules, i.e. sans tenir compte de la porosité.

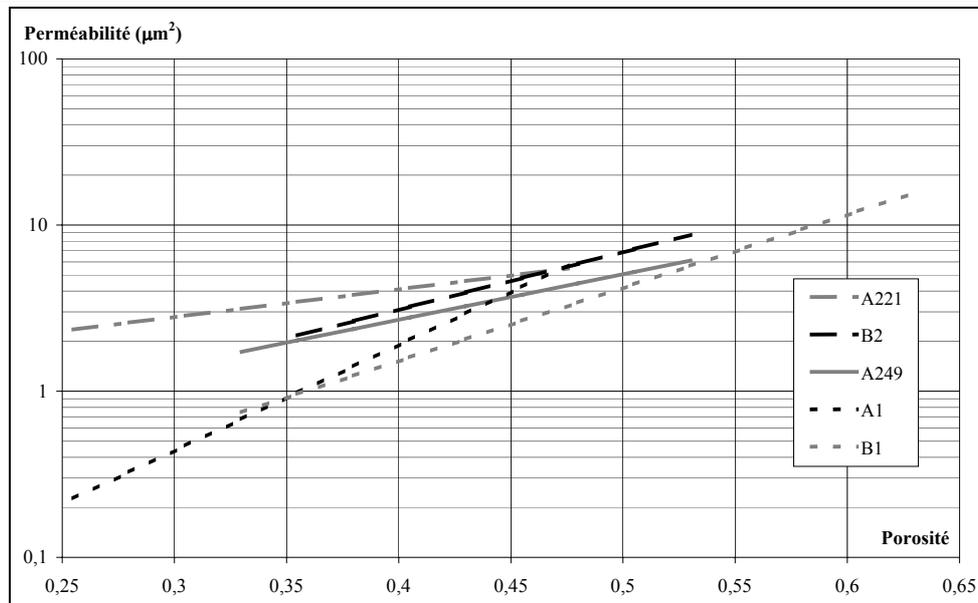


Figure III-20 : Comparaison des comportements de la perméabilité transversale des feutres testés

Chaque feutre testé montre une diminution de la perméabilité transversale différente lorsque la porosité diminue. Cependant pour les feutres A249 et B2, les perméabilités possèdent un comportement similaire tout au long de leur compression. Cette particularité n'était pas prévisible de part la mesure de perméabilité à l'air (fig. III-11). Les feutres avec un double canevas (A221, A249, B1 et B2) présentent une perméabilité du même ordre de grandeur que les feutres avec un canevas simple (A1, A2, A3 et A4) dont les résultats sont présentés figures III-21 à III-24 pour une même porosité. Dans la zone commune à toutes les courbes, i.e. pour une porosité variant de 0,46 à 0,35, la perméabilité est néanmoins du même ordre de grandeur pour tous les feutres.

### 2.3 Mesures de perméabilité longitudinale.

L'exploitation des résultats de mesures de perméabilité longitudinale est réalisée comme précédemment. La perméabilité longitudinale est mesurée dans 3 directions correspondant au sens marche de la machine, au sens travers (perpendiculaire au sens machine) et une direction formant un angle de 45° avec le sens machine.

Les modèles utilisés sont identiques à ceux employés précédemment. Les paramètres de la loi de Kozeny-Carman sont présentés à la fin de cette partie. L'intervalle de sollicitation mécanique est le même que précédemment, i.e. 0,5 à 6 MPa. L'intervalle de porosité correspondant est sensiblement le même, i.e. 0,65 à 0,25. L'intervalle de la perméabilité s'étend de 70 à 0,4  $\mu\text{m}^2$ . Les résultats montrent que les feutres testés sont isotropes dans le plan à l'exception du feutre A249.

Les perméabilités longitudinales des feutres A1, A2, A3 et A4 ont des comportements très semblables (fig. III-21 à 24). L'orientation des fibres des voiles ne semble affecter ni l'anisotropie de la perméabilité longitudinale (variation de la perméabilité avec la direction de mesure), ni son évolution avec la compression.

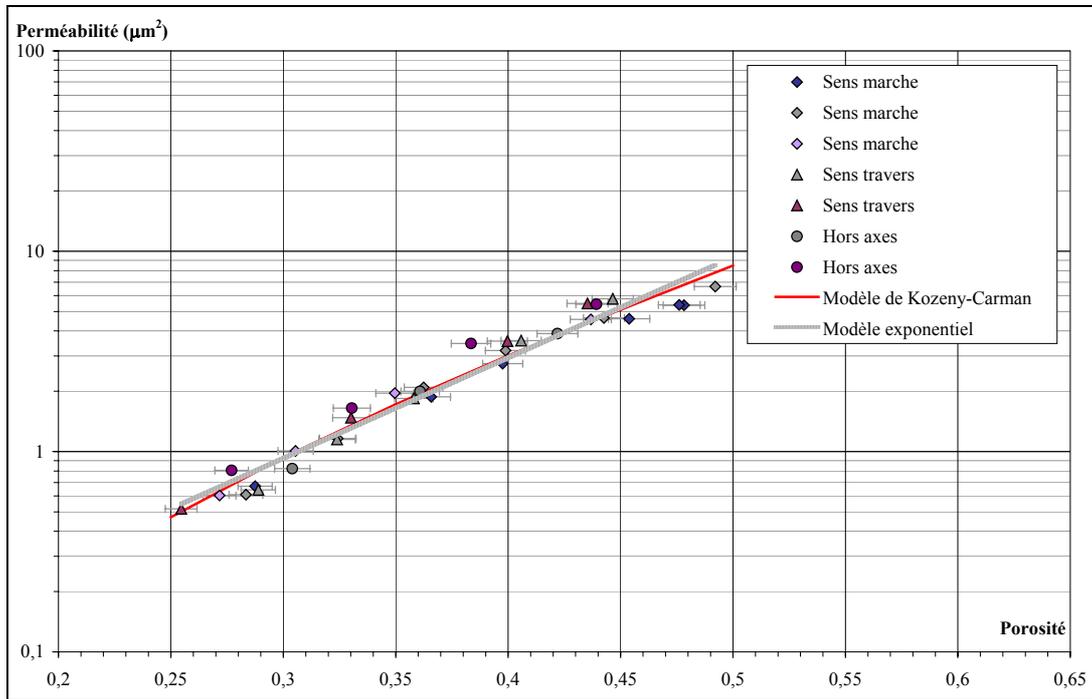


Figure III-21 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A1

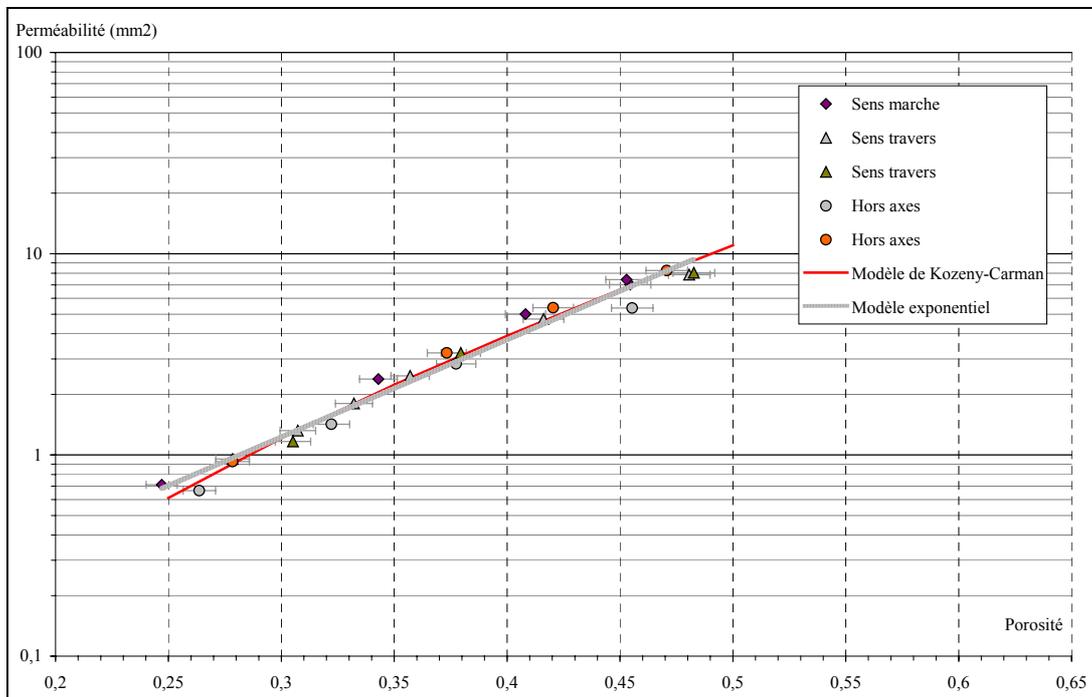


Figure III-22 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A2

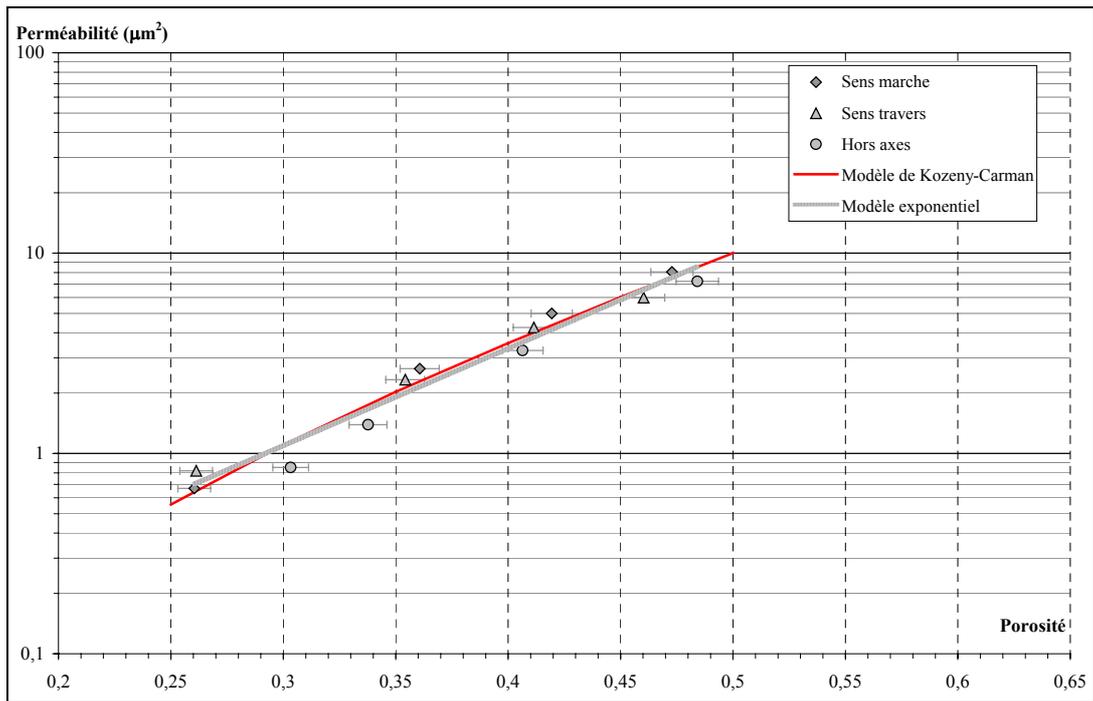


Figure III-23 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A3

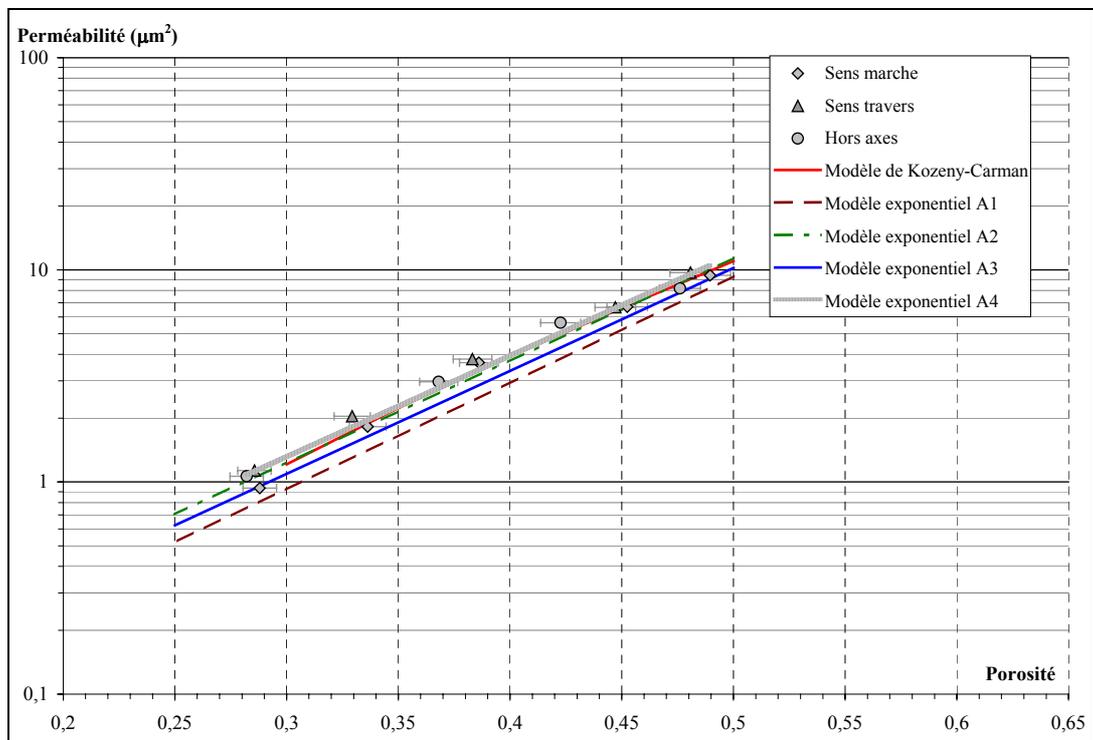


Figure III-24 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A4

Contrairement aux résultats présentés précédemment, ceux concernant le feutre A249 montrent que l'anisotropie de la perméabilité longitudinale augmente sensiblement avec la compression (fig. III-25). Il est à noter que le rapport de la perméabilité sens travers sur la perméabilité sens marche reste proche de 1,5. Le calcul de la détermination des axes principaux est présenté ci-après.

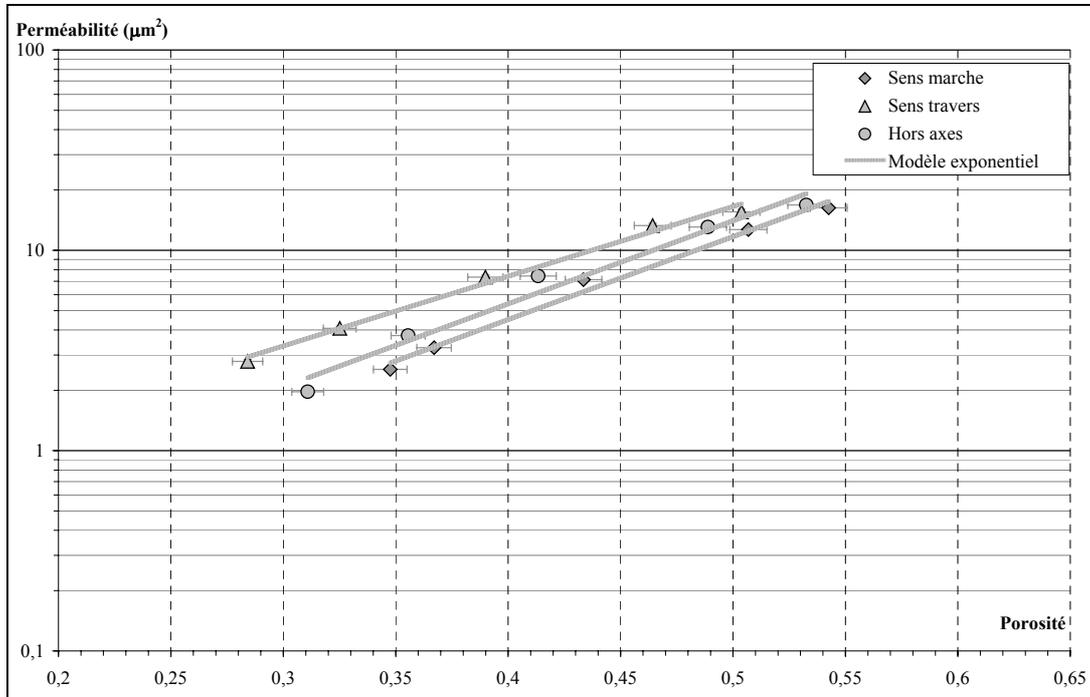


Figure III-25 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A249

Pour déterminer les axes et valeurs propres, il est nécessaire de connaître au moins les valeurs de perméabilité dans trois directions différentes (fig. III-26).

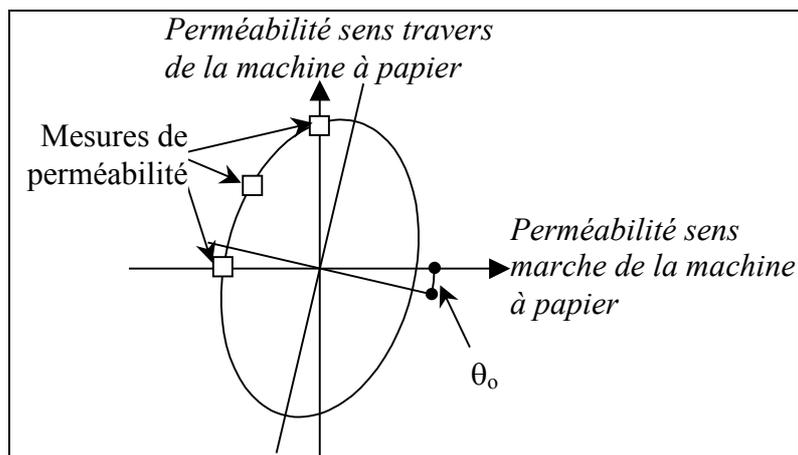


Figure III-26 : Détermination des axes et valeurs propres.

Dans notre cas, nous avons mesuré la perméabilité longitudinale dans les directions sens marche et sens travers de la machine à papier ainsi que dans une direction intermédiaire. Ces données permettent de résoudre le système d'équation suivant (le sens marche de la machine à papier est pris comme origine angulaire cf. fig. III-26) :

$$\begin{cases} K_{90} = K_M \cos^2(90 - \theta_o) + K_m \sin^2(90 - \theta_o) \\ K_o = K_M \cos^2(\theta - \theta_o) + K_m \sin^2(\theta - \theta_o) \\ K_\theta = K_M \cos^2(\theta - \theta_o) + K_m \sin^2(\theta - \theta_o) \end{cases}$$

Ce système est équivalent à :

$$\begin{cases} K_{90} + K_o = K_M + K_m \\ K_{90} - K_o = -(K_M - K_m) \cos(2\theta_o) \\ K_\theta = K_M \cos^2(\theta - \theta_o) + K_m \sin^2(\theta - \theta_o) \end{cases}$$

On peut alors exprimer les valeurs principales du tenseur perméabilité pour les remplacer dans la dernière ligne du système :

$$\begin{cases} 2K_M = K_o + K_{90} - \frac{K_{90} - K_o}{\cos(2\theta_o)} \\ 2K_m = K_o + K_{90} + \frac{K_{90} - K_o}{\cos(2\theta_o)} \\ 2K_\theta = K_o + K_{90} - (K_{90} - K_o) \frac{\cos(2(\theta - \theta_o))}{\cos(2\theta_o)} \end{cases}$$

La valeur de la tangente de l'angle  $\theta_o$  est :

$$(K_o + K_{90}) - 2K_\theta = (K_{90} - K_o) (\cos(2\theta) + \sin(2\theta) \tan(2\theta_o))$$

$$\tan(2\theta_o) = \frac{(K_o + K_{90}) - 2K_\theta}{(K_{90} - K_o) \sin(2\theta)} - \cot(2\theta)$$

La détermination des axes principaux en utilisant ces expressions montre que ceux-ci sont proches des directions classiquement utilisées (sens marche et sens travers). Le décalage angulaire passe de  $-3^\circ$  en début de compression (porosité de 0,5) à  $11^\circ$  lorsque la porosité atteint 0,3. Cette variation peut être attribuée en partie aux incertitudes de mesures de perméabilité et de mise en position du feutre.

La perméabilité longitudinale du feutre B1 est isotrope. La loi de Kozeny-Carman ne permet pas une évaluation correcte de l'évolution de la perméabilité du feutre lors de sa compression (fig. III-27).

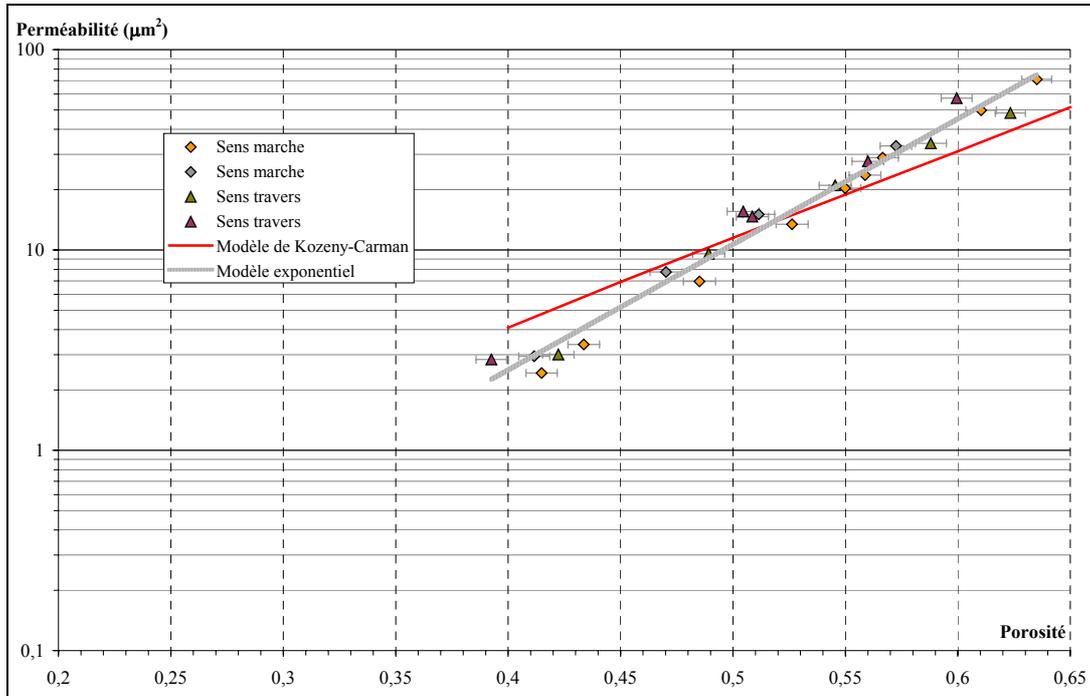


Figure III-27 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre B1.

L'orientation des fibres des voiles des feutres A1, A2, A3 et A4 n'a aucune influence significative sur la perméabilité longitudinale puisque pour tous ces feutres l'évolution de la perméabilité avec la compression est similaire.

Feutre	Régression Kozeny-Carman	R <sup>2</sup>	Régression modèle puissance	R <sup>2</sup>	Domaine de validité
A1	$\frac{17 \cdot \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}$	0,921	$0,0288 \cdot 10^{5,021 \cdot \varepsilon}$	0,958	$0,25 \leq \varepsilon \leq 0,49$
A2	$\frac{22 \cdot \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}$	0,949	$0,0435 \cdot 10^{4,835 \cdot \varepsilon}$	0,978	$0,25 \leq \varepsilon \leq 0,48$
A3	$\frac{20 \cdot \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}$	0,958	$0,0383 \cdot 10^{4,853 \cdot \varepsilon}$	0,964	$0,26 \leq \varepsilon \leq 0,48$
A4	$\frac{22 \cdot \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}$	0,987	$0,0492 \cdot 10^{4,756 \cdot \varepsilon}$	0,985	$0,29 \leq \varepsilon \leq 0,49$
A249	Sens travers $\Rightarrow$		$0,220 \cdot 10^{3,760 \cdot \varepsilon}$	0,965	$0,28 \leq \varepsilon \leq 0,54$
	45° $\Rightarrow$		$0,119 \cdot 10^{4,146 \cdot \varepsilon}$	0,973	
	Sens Marche $\Rightarrow$		$0,100 \cdot 10^{4,138 \cdot \varepsilon}$	0,988	
B1	$\frac{23 \cdot \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}$	0,846	$0,0078 \cdot 10^{6,268 \cdot \varepsilon}$	0,975	$0,39 \leq \varepsilon \leq 0,64$

Tableau 7 : Simulation des résultats expérimentaux concernant la perméabilité longitudinale avec la loi de Kozeny-Carman et une loi exponentielle. R<sup>2</sup> est le coefficient de corrélation. La dernière colonne correspond au domaine de porosité des données expérimentales.

La perméabilité longitudinale des feutres testés est supérieure ou égale à la perméabilité transversale en restant du même ordre de magnitude.

Dans une zone commune de porosité comprise entre 0,5 et 0,35, les feutres testés ont le même ordre de grandeur de perméabilité ( $4 \mu\text{m}^2$ ) quelle que soit la direction testée (transversale ou longitudinale).

Bien que très répandue, la loi de Kozeny-Carman n'est pas toujours judicieuse pour modéliser l'évolution de la perméabilité des feutres. La loi phénoménologique exponentielle proposée représente de façon satisfaisante les résultats dans tous les essais. Pour relier les paramètres de ce modèle aux caractéristiques physiques du feutre, d'autres mesures de perméabilité sont nécessaires en effectuant par exemple un plan d'expérience comme dans l'étude rhéologique conduite par Lopez (Lopez S. 1991).

### III.3 Influence de la tension sur le tenseur des perméabilités.

#### 3.1 Mesure de la perméabilité transversale.

Le cadre de mise en tension utilisé pour solliciter le feutre a été décrit dans le chapitre II. Seuls, les échantillons de feutre suffisamment longs ont pu être testés. Le protocole expérimental est identique à celui suivi dans l'étude de l'influence de la compression seule. Après avoir imposé une tension, l'influence de la compression sur la perméabilité est étudiée. Après cette étape la compression est annulée avant d'augmenter la tension et de recommencer un nouveau cycle de mesures en compression. Pour chaque essai le feutre est tendu successivement à  $233 \text{ daN.m}^{-1}$ , puis à  $547 \text{ daN.m}^{-1}$  et enfin à  $853 \text{ daN.m}^{-1}$ . Les compressions imposées sont successivement  $0,4 \text{ MPa}$ ,  $1,6 \text{ MPa}$  et  $4,7 \text{ MPa}$ . Cette méthode permet d'étudier l'influence de la tension sur la compression du feutre en parallèle de l'étude de la perméabilité. Pour tous les feutres testés, la tension n'a eu aucune incidence significative ni sur l'évolution de la perméabilité transversale lors de sa compression, ni sur la rhéologie du feutre (fig. III-28 à 31).

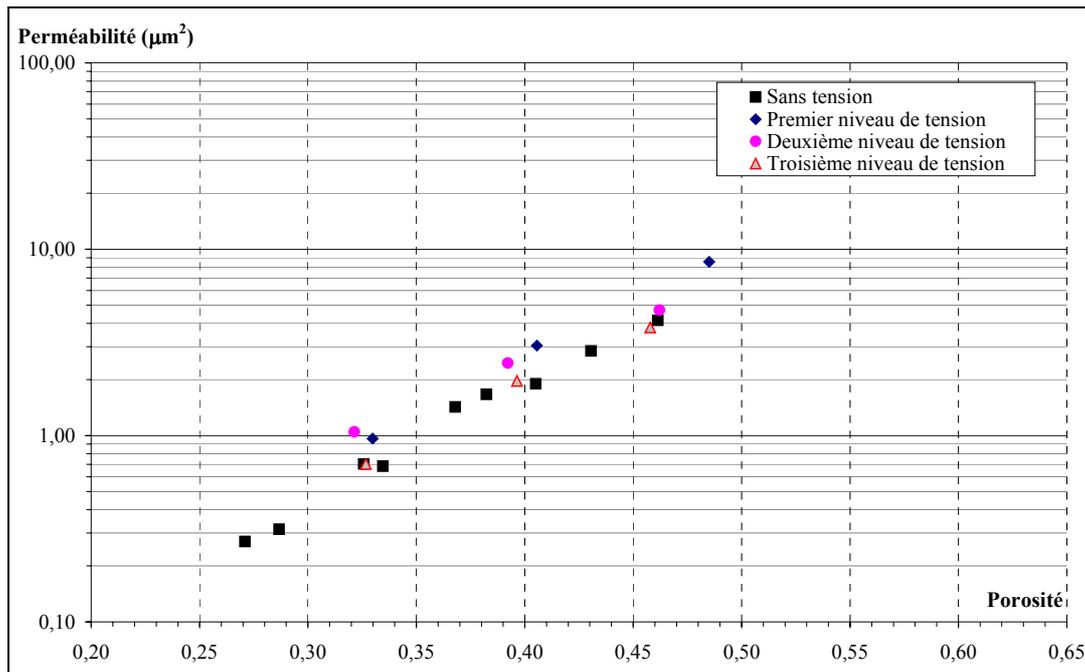


Figure III-28 : Influence de la tension sur l'évolution de la perméabilité transversale lors de la compression du feutre A1. Le feutre est tendu à  $233 \text{ daN.m}^{-1}$ , à  $547 \text{ daN.m}^{-1}$  et à  $853 \text{ daN.m}^{-1}$ .

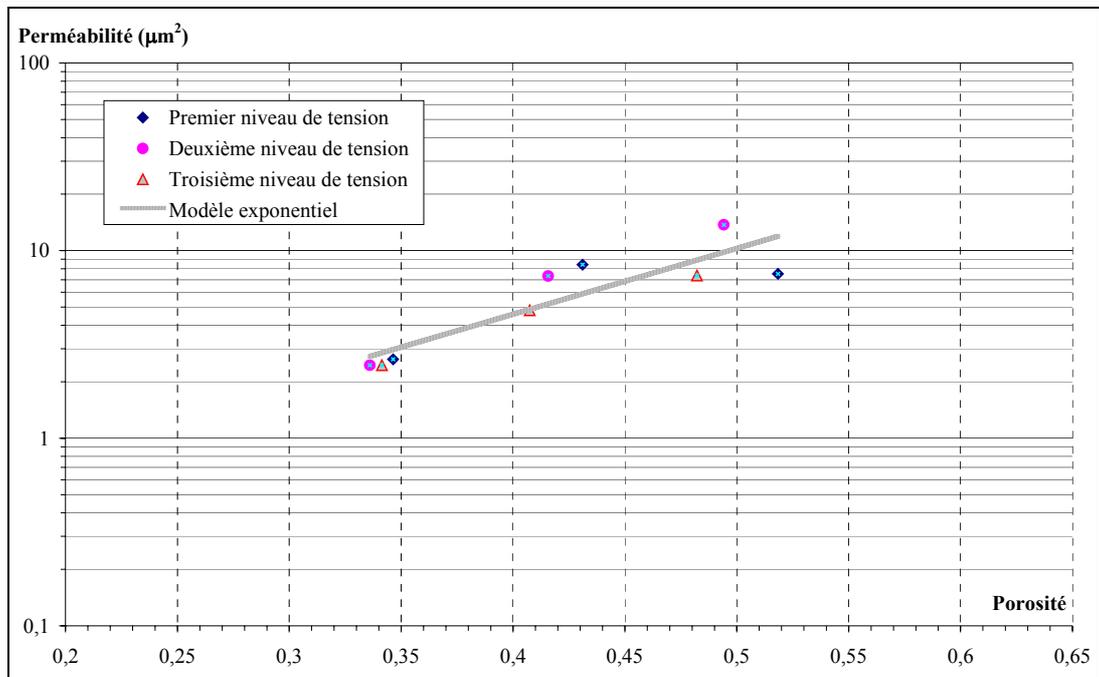


Figure III-29 : Influence de la tension sur l'évolution de la perméabilité transversale lors de la compression du feutre A2. Le feutre est tendu à  $233 \text{ daN.m}^{-1}$ , à  $547 \text{ daN.m}^{-1}$  et à  $853 \text{ daN.m}^{-1}$ .

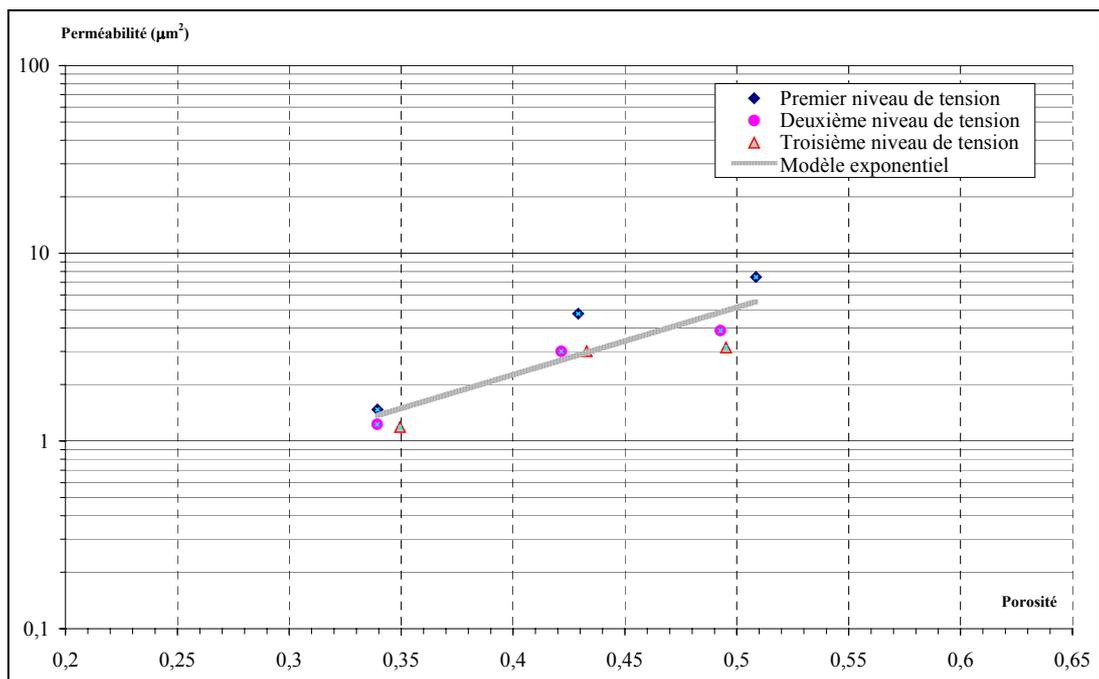


Figure III-30 : Influence de la tension sur l'évolution de la perméabilité transversale lors de la compression du feutre A3. Le feutre est tendu à  $233 \text{ daN.m}^{-1}$ , à  $547 \text{ daN.m}^{-1}$  et à  $853 \text{ daN.m}^{-1}$ .

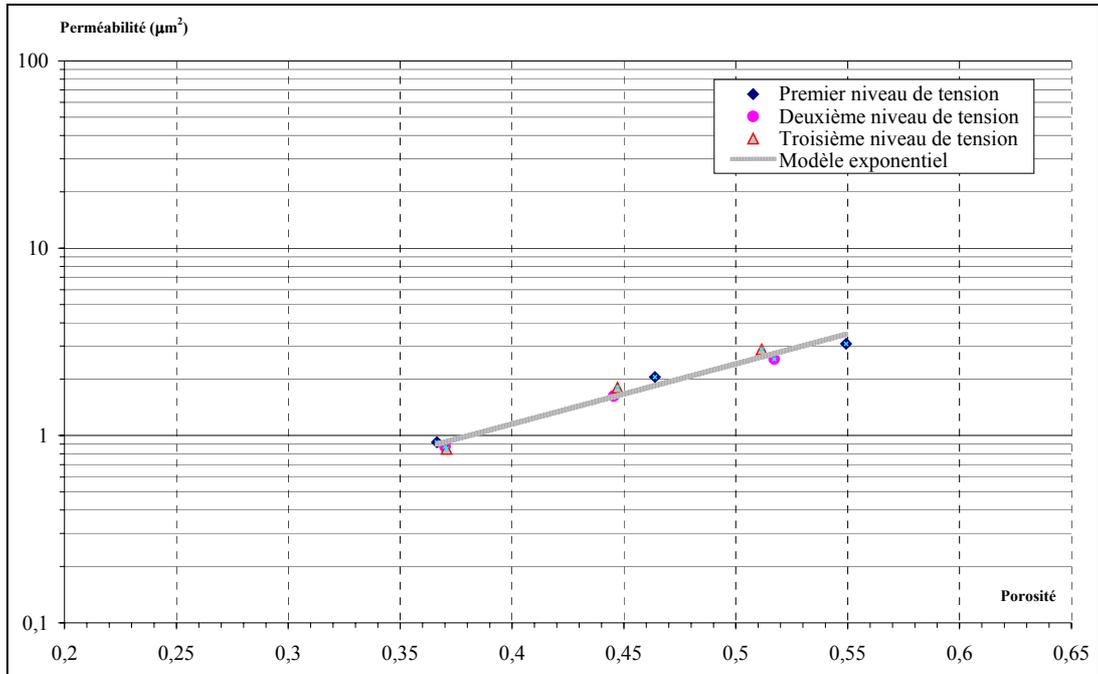


Figure III-31 : Influence de la tension sur l'évolution de la perméabilité transversale lors de la compression du feutre A4. Le feutre est tendu à 233 daN.m<sup>-1</sup>, à 547 daN.m<sup>-1</sup> et à 853 daN.m<sup>-1</sup>.

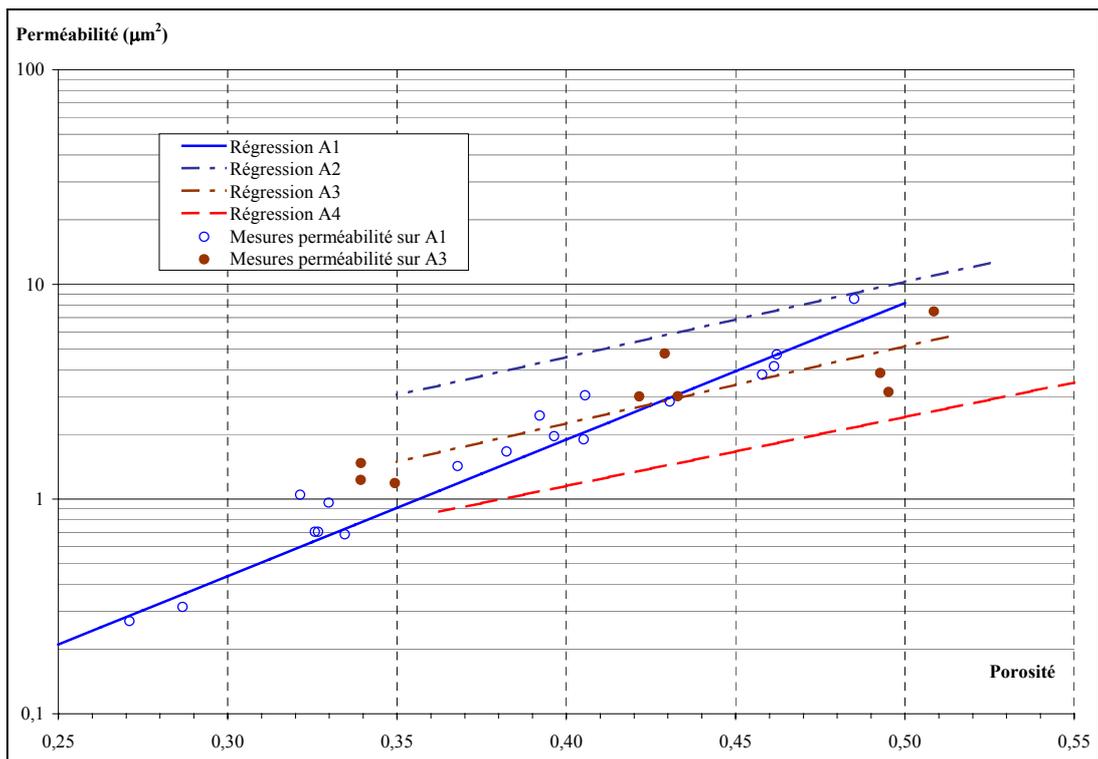


Figure III-32: Comparaison des évolutions de la perméabilité transversale pour les feutres A1, A2, A3 et A4

Le feutre A2, dont l'orientation des fibres des voiles est isotrope, montre une perméabilité transversale plus élevée que les feutres A1, A3 et A4 dont les voiles sont orientés (fig. III-32). Les feutres A1 et A3, dont les voiles sont orientés respectivement sens travers et sens marche, montrent des comportements similaires. Le feutre A4 dont les voiles sont les plus complexes, car composés de couches superposées de fibres orientées alternativement à 45° de part et d'autre du sens marche, a la perméabilité transversale la plus faible (fig. III-32). L'orientation des voiles semble avoir tendance à diminuer la perméabilité transversale.

Dans le tableau 8, sont regroupés les résultats des régressions sur les données expérimentales en utilisant le modèle exponentiel.

Nom	Modèle	R <sup>2</sup>	Domaine de validité
A1	$0,0054 \cdot 10^{6,362 \cdot \varepsilon}$	-	$0,27 \leq \varepsilon \leq 0,46$
A2	$0,1805 \cdot 10^{3,511 \cdot \varepsilon}$	0,791	$0,34 \leq \varepsilon \leq 0,52$
A3	$0,0829 \cdot 10^{3,586 \cdot \varepsilon}$	0,786	$0,34 \leq \varepsilon \leq 0,51$
A4	$0,0599 \cdot 10^{3,210 \cdot \varepsilon}$	0,972	$0,37 \leq \varepsilon \leq 0,55$

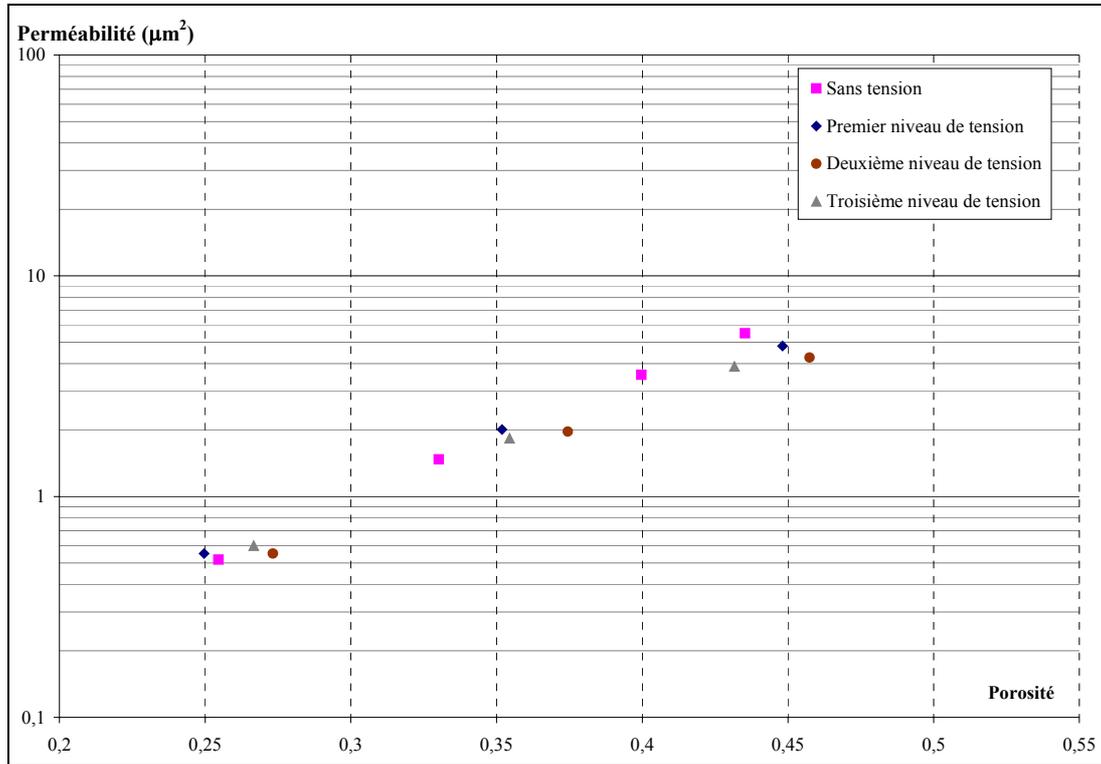
**Tableau 8 : Résultats des régressions pour la modélisation de la perméabilité transversale des feutres testés**

### 3.2 Mesure de la perméabilité longitudinale.

Afin d'étudier l'influence de la tension sur la perméabilité longitudinale, les essais concerneront uniquement le feutre A1. En effet, le comportement de la perméabilité longitudinale des feutres A1, A2, A3 et A4 avec la compression a été trouvé similaire. Les échantillons des autres feutres ne sont pas assez longs pour être mis en place dans le cadre de mise en tension. Des mesures de perméabilité longitudinale sens marche et sens travers sur le feutre A1, sont réalisées.

Le feutre saturé est placé dans le cadre de mise en tension. L'échantillon est tout d'abord tendu puis la perméabilité est mesurée pour plusieurs niveaux de compression.

Les résultats de ces mesures de perméabilité longitudinale montrent que le comportement de la perméabilité longitudinale du feutre A1 est invariant lorsque la tension augmente (fig. III-33).



**Figure III-33 : Influence de la tension sur la perméabilité longitudinale sens marche.**

L'influence de la tension dans le sens marche de la machine à papier sur la compressibilité et sur la perméabilité des feutres a été étudiée mais aussi l'influence de l'orientation des voiles du feutre. La mise en tension du feutre dans le sens marche de la machine à papier n'a aucune influence sur le tenseur perméabilité ainsi que sur la compressibilité des feutres testés. Les travaux de Chevallier ont montré sensiblement les mêmes résultats.

L'orientation du voile semble diminuer la perméabilité transversale sans influencer la compressibilité du feutre et sa perméabilité longitudinale. La perméabilité transversale la plus faible a été mesurée pour les voiles composés de strates orientées successivement à 45° de part et d'autre du sens de fabrication.

### III.4 Conclusion.

Lors de l'optimisation d'une section de presses, un feutre doit être sélectionné. Généralement, ce choix est fait, parmi d'autres raisons, en fonction de la capacité alvéolaire du feutre lors de son passage dans la pince et en fonction de sa perméabilité transversale à l'air dans un état non déformé. Ce chapitre a montré que le nouveau perméamètre permet d'une part d'étudier la rhéologie du feutre en tension et en compression et d'autre part d'étudier le comportement du tenseur perméabilité pendant la déformation du feutre. Les résultats expérimentaux ont montré que la tension du feutre (pouvant aller à  $853 \text{ daN.m}^{-1}$ ) dans le sens marche de la machine à papier n'avait aucune influence tant sur la rhéologie que sur le tenseur perméabilité du feutre.

Les résultats concernant la perméabilité transversale ont montré que le comportement de la résistance à l'écoulement des feutres en fonction de leur déformation ne peut être appréhendé correctement avec un perméamètre de type Frazier.

Pour tous les feutres testés, la perméabilité longitudinale est supérieure ou égale à la perméabilité transversale quel que soit le niveau de déformation.

L'anisotropie de la structure (orientation préférentielle des voiles ou tissage du canevas) n'implique pas une anisotropie du tenseur perméabilité longitudinale.

La décroissance de la perméabilité transversale ou longitudinale souvent très forte est correctement décrite par une loi puissance. La relation de Kozeny-Carman souvent utilisée dans les modèles de pressage, n'est pas appropriée pour la modélisation de tous les feutres.

## CHAPITRE IV

# *ANALYSE STRUCTURALE*



## Chapitre IV : ANALYSE STRUCTURALE.

Lors de la modélisation du pressage, la description des phénomènes physiques est réalisée à une échelle beaucoup plus grande que celle caractéristique des constituants des matériaux. En générale, la description macroscopique est obtenue expérimentalement. Ce quatrième chapitre propose une approche différente par des techniques de caractérisation structurale, permettant de dégager les propriétés et les phénomènes physiques du comportement global. Cette approche est inspirée par les méthodes existantes d'analyses structurales des matériaux poreux. Ainsi, le but de ce chapitre est de trouver au niveau du volume élémentaire représentatif, les paramètres géométriques de l'échelle microscopique significatifs du comportement macroscopique.

Tout d'abord, afin de caractériser la structure poreuse, la conductimétrie et la porosimétrie, méthodes de caractérisation classiques, sont utilisées afin de comparer les structures. Ensuite la technique de caractérisation par microtomographie aux rayons X est employée pour décrire et reconstruire numériquement la structure microscopique du feutre. Les résultats de la microtomographie sont comparés à ceux de la porosimétrie. Finalement quelques perspectives de simulations numériques sur les structures reconstruites sont présentées.

### IV.1 Conductibilité.

La conductibilité  $\sigma_r$  est la propriété d'un matériau à transmettre la chaleur ou l'électricité. Le feutre est un matériau biphasique composé d'air et de nylon. Les valeurs de conductibilité de ces deux matériaux étudiés séparément, sont connues. La conductibilité du nylon est de  $0,25 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ . Celle de l'air, à un degré d'humidité standard et à une température de  $20^\circ\text{C}$ , est de  $0,024 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ . Les conductibilités des phases constituant le feutre sont très contrastées. Afin de comparer la structure du feutre avec d'autres matériaux poreux biphasiques, les résultats des mesures de conductibilité du feutre sont adimensionnés par la conductibilité  $\sigma_n$  du nylon (la conductibilité de l'air est négligée). L'inverse de la conductibilité adimensionnée est souvent appelé facteur de formation (Éq. IV:1) :

$$F = \frac{\sigma_n}{\sigma_r} \quad \text{Équation IV:1 (Facteur de formation).}$$

F est supérieur à l'unité. Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre III, ce paramètre est parfois relié à la tortuosité et à la porosité du milieu (Oger L., Gauthier C. & al. 1989). Plus le facteur de formation est grand, plus la chaleur (ou le courant électrique) traverse la structure difficilement.

Ce paramètre est utilisé pour caractériser des géomatériaux comme par exemple des grès de Fontainebleau (Adler P. M. et Thovert J.-F. 1998). Dans ces travaux, le facteur de formation évalué pour les pores, est corrélé à la porosité. L'influence de la porosité sur le facteur de formation vérifie alors la loi d'Archie (1942) (Éq. IV:2 ).

$$F = \alpha \varepsilon^{-m} \quad \text{Équation IV:2 : Loi d'Archie}$$

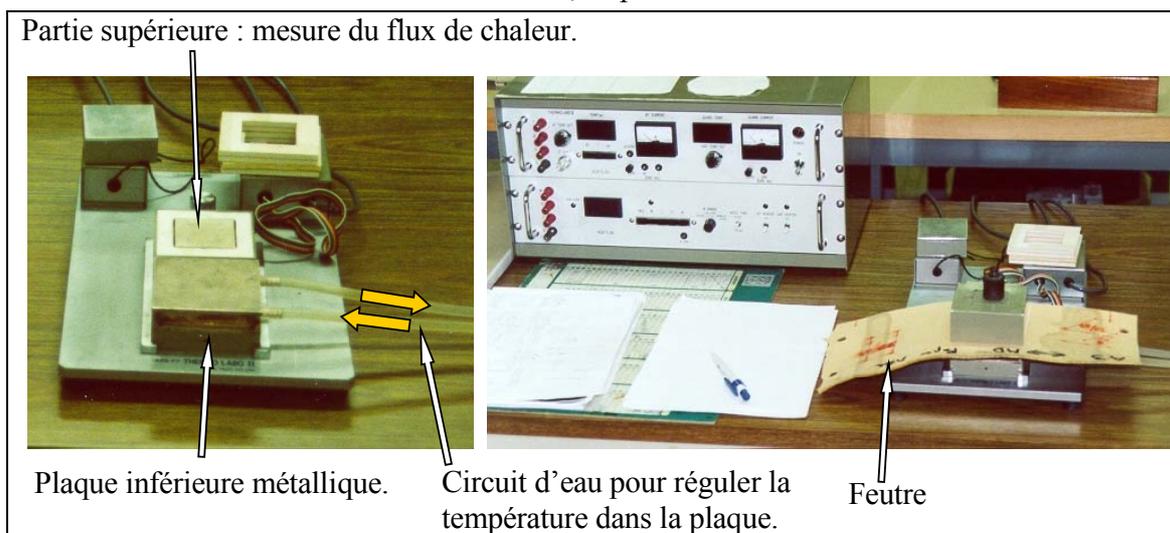
où  $\alpha$  et  $m$  sont des paramètres expérimentaux.

Pour des grès de Fontainebleau,  $\alpha$  a pour valeur 1,27, et  $m$ , 1,64. La porosité est comprise entre 0,05 et 0,3.

Les mesures de conductibilité thermique présentées dans le cadre de ce travail ont été réalisées à l'ENSITM (École Nationale Supérieure des Industries du Textile de Mulhouse). Le feutre sec est placé entre deux plaques carrées de 5 cm de côté (fig. IV-1). À travers la plaque inférieure, le flux de chaleur est imposé et régulé de sorte que les deux faces du feutre soient aux températures indiquées par l'opérateur. Dans notre cas, les consignes de température sont de 20°C au-dessus du feutre et de 29,8°C en dessous. Lorsque l'état stationnaire est atteint, la puissance thermique est mesurée afin d'évaluer la conductibilité du feutre. Dans ce but, la relation suivante issue de la loi de Fourier est utilisée :

$$\frac{P_{th}}{S} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{e} \quad \text{Équation IV:3}$$

avec  $P_{th}$ , la puissance thermique mesurée,  
 $S$ , la surface de contrôle,  
 $\lambda$ , le coefficient de conductibilité,  
 $\Delta T$ , la différence de température entre les faces du feutre,  
 $e$ , l'épaisseur du feutre.



**Figure IV-1 : Description de l'appareil de l'ENSITM permettant la mesure de la conductibilité thermique.**

Pour obtenir le contact du feutre sur toute la surface des plaques, une masse est posée sur la plaque supérieure. La contrainte de compression correspondante est alors de 530 Pa.

L'épaisseur du feutre sous une contrainte identique est mesurée à l'aide d'un capteur de proximité comme indiqué dans le paragraphe III.2.1.

Les résultats des mesures sont regroupés dans le tableau 9 ci-dessous. Pour tous les feutres testés, le facteur de formation est de l'ordre de 4. Aucune influence du canevas, du grammage du feutre ou de sa porosité sur le facteur de formation n'a pu être mise en évidence par ces mesures.

<b>Feutre</b>	<b>Conductibilité adimensionnelle</b>	<b>Facteur de formation</b>	<b>Porosité</b>
A2	0,223	4,48	0,66
A3	0,258	3,88	0,67
A4	0,229	4,37	0,68
A249	0,271	3,69	0,74
B1	0,250	4,00	0,77
B2	0,232	4,31	0,79

**Tableau 9 : Résultats des mesures de conductibilité thermique transversale. Les valeurs mesurées sont adimensionnées par la conductibilité du nylon. Le facteur de formation est l'inverse de la conductibilité adimensionnelle. La porosité est évaluée d'après les mesures d'épaisseur réalisées avec les mêmes conditions de contrainte que lors des mesures de conductibilité.**

Le facteur de formation de la structure fibreuse, mesuré dans la direction transversale, dépend essentiellement de la géométrie des fibres et de la distribution spatiale des contacts. Les fibres utilisées pour les voiles des feutres A2, A3 et A4 sont identiques. Le feutre A3 dont les fibres sont orientées préférentiellement dans le sens marche du plan du feutre, montre un facteur de formation plus faible que le feutre A2 dont les fibres ont une orientation isotrope dans le plan. L'aiguilletage étant identique pour les deux feutres, l'orientation préférentielle des voiles dans le sens marche semble avoir amélioré la transmission de chaleur à travers la structure. Les résultats concernant le feutre A4 vont eux aussi dans ce sens. En effet, les fibres des voiles du feutre A4 sont orientées préférentiellement dans le plan à 45° de part et d'autre du sens marche. Ainsi, l'orientation des fibres des voiles dans le plan du feutre semble améliorer sa conductibilité transversale.

La comparaison du modèle d'Archie (Éq. IV:2) avec les valeurs de facteur de formation concernant le feutre, nous conduit à considérer l'évolution de ce paramètre en fonction de  $(1-\varepsilon)$ . En effet, nous estimons le facteur de formation de la structure et non celui du réseau de pores. Le modèle d'Archie représente bien les variations du facteur de formation en fonction de la porosité des feutres avec les valeurs suivantes pour les paramètres :  $\alpha=4$  et  $m=0$ , i.e. une fonction constante égale à 4 (fig. IV-2). La comparaison de la modélisation des grès de Fontainebleau et des feutres révèle que l'influence de la porosité sur le facteur de formation des feutres non déformés est très différente de celle correspondant aux grès de Fontainebleau (fig. IV-2).

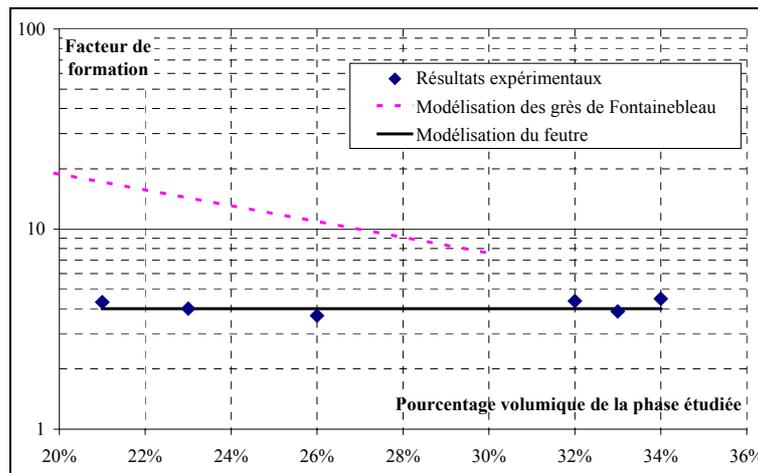


Figure IV-2 : Modélisation des résultats expérimentaux par la loi d'Archie. Évolution du facteur de formation en fonction de  $\varepsilon$  pour les grès de Fontainebleau, et en fonction de  $(1-\varepsilon)$  pour les feutres non déformés. Chaque point représente un feutre différent dans un état non déformé.

Les facteurs de formation de chaque feutre non déformé sont ensuite comparés avec les mesures de perméabilité à l'air présentées dans le chapitre III. Aucune corrélation entre le facteur de formation et la perméabilité à l'air n'a pu être mise en évidence (fig. IV-3).

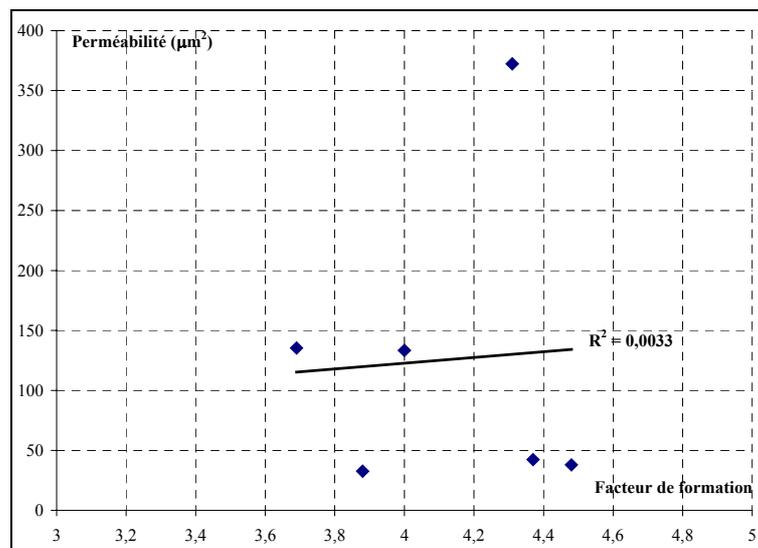


Figure IV-3 : Corrélation entre le facteur de formation des feutres sans déformation et leur perméabilité à l'air.

Les mesures de conductibilité thermique de feutres non déformés n'ont pas permis de différencier nettement les feutres, et par conséquent, de caractériser leur structure. L'évolution du facteur de formation en fonction de la déformation pourrait cependant être envisagée afin de vérifier l'augmentation de ce paramètre avec la déformation.

## IV.2 Porosimétrie.

### 2.1 Introduction.

Un matériau poreux est constitué de matière et de pores, volumes où il n'y a pas de matière. La porosimétrie au mercure est couramment utilisée dans l'étude de ces milieux afin d'en caractériser la porosité ouverte (Xu K. 1995), i.e. ensemble des pores non totalement fermés. Cette technique est utilisée par Rebenfeld (Rebenfeld L. et Miller B. 1995) pour caractériser des milieux tissés et non-tissés. Son exemple est suivi pour nos investigations sur le feutre. Cette technique caractérise la porosité, la distribution des tailles de pores et la surface spécifique du matériau. Pour cela, après avoir fait le vide dans l'échantillon, du mercure est injecté. La pression du mercure ainsi que la quantité de mercure pénétrant dans la structure poreuse sont alors reliées aux caractéristiques des pores. Tout d'abord, les phénomènes physiques à la base des mesures effectuées en porosimétrie vont être décrits. Puis, cette technique sera utilisée afin d'évaluer l'influence de la compression sur le réseau poreux des feutres.

#### 2.1.a Préambule.

Considérons un liquide en équilibre avec un solide et un gaz (fig. IV-4). La forme finale du ménisque (i.e. interface fluide/gaz) résulte de l'équilibre des forces ayant pour origine l'interaction moléculaire aux frontières des deux fluides. Cette interaction est appelée tension superficielle et sera notée  $\gamma_{\text{phase1/phase2}}$ . Elle est exprimée dans le système d'unités internationales en  $\text{N.m}^{-1}$  ou en  $\text{J.m}^{-2}$  mais plus souvent le  $\text{dyne.cm}^{-1}$  ( $10^{-3} \text{N.m}^{-1}$ ) est utilisé. Elle dépend de l'équilibre thermodynamique des deux phases en équilibre et par conséquent de la température et de la pression. L'angle  $\theta$  formé par les normales aux surfaces dirigées vers l'intérieur du liquide (fig. IV-4) est appelé angle de contact ou angle de mouillage.

Par la suite, les indices  $s$ ,  $l$  et  $g$  désigneront respectivement les phases solide, liquide et gazeuse. L'équilibre de l'arrête, ligne commune aux trois milieux se traduit par la relation de Young-Dupré déterminant les conditions de raccord des interfaces (Fourcade B. 1998) :

$$\gamma_{s/l} = \gamma_{s/g} + \gamma_{l/g} \cos(\theta) \quad \text{Équation IV:4}$$

avec  $\gamma_{s/l}$  représentant la tension superficielle à l'interface solide liquide,

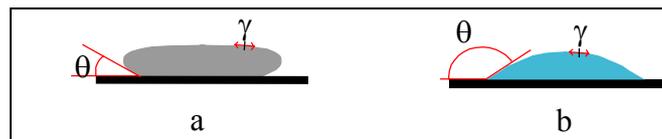
$\gamma_{s/g}$ , la tension superficielle à l'interface solide gaz,

$\gamma_{l/g}$ , la tension superficielle à l'interface liquide gaz,

$\theta$ , angle de mouillage défini sur la figure IV-4.

Cette condition d'équilibre amène à considérer trois cas sur les valeurs de  $\theta$ :

- ⊗ Si  $\gamma_{s/l} > \gamma_{s/g} + \gamma_{l/g}$  alors il n'existe pas de valeur possible de  $\theta$  permettant de satisfaire la relation de Young-Dupré.
- ⊗ Si  $\gamma_{s/l} < \gamma_{s/g} + \gamma_{l/g}$  et  $\gamma_{s/l} > \gamma_{s/g}$  alors il existe une valeur de  $\theta$  inférieure à  $\frac{\pi}{2}$  permettant de satisfaire la relation de Young-Dupré. On dit alors que le liquide ne mouille pas le solide (fig. IV-4.a).
- ⊗ Si  $\gamma_{s/l} < \gamma_{s/g} + \gamma_{l/g}$  et  $\gamma_{s/l} < \gamma_{s/g}$  alors il existe une valeur possible de  $\theta$  supérieure à  $\frac{\pi}{2}$  permettant de satisfaire la relation de Young-Dupré. On dit alors que le liquide mouille le solide (fig. IV-4.b).



**Figure IV-4 : Goutte de fluide sur un support (en noir). Définition de l'angle de contact  $\theta$  et de la tension superficielle  $\gamma$ . a) fluide non mouillant, b) fluide mouillant**

La forme de la surface libre est donnée par la loi de Laplace (Mouette J. 1998) :

$$\Delta P = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{ou bien} \quad \Delta P = \gamma \left( \frac{\Delta \xi}{(1 + \nabla^2 \xi)^{3/2}} \right) \quad \text{Équation IV:5}$$

avec  $\Delta P$ , différence de pression de part et d'autre de l'interface,  
 $R_1$  et  $R_2$ , les rayons de courbure principaux de la surface interface,

$\xi$ , l'équation de la surface interface.

2.1.b Principes de fonctionnement du porosimètre.

La porosimétrie permet d'étudier la porosité par intrusion d'un liquide non mouillant (Xu K. 1995). Pour simplifier l'étude de la surface libre du liquide, considérons un liquide non mouillant dans un capillaire cylindrique. Étudions l'équilibre des forces s'exerçant sur l'interface liquide/gaz dans une telle configuration. (fig. IV-5) :

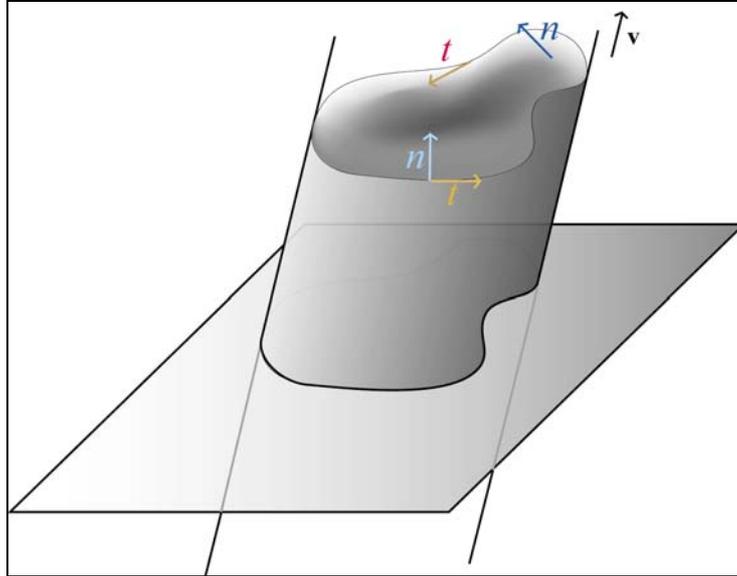


Figure IV-5 : Illustration de l'intrusion dans un capillaire d'un liquide non mouillant. Le fluide est en gris. Le gaz est incolore.

Force résultant de la pression du liquide sur l'interface :

$$\iint_{\text{Interface}} P_1 \mathbf{n} \, ds \quad \text{Équation IV:6}$$

avec  $\mathbf{n}$  normale à l'interface fluide/gaz (fig. IV-5).

Force résultant de la pression du gaz sur l'interface :

$$\iint_{\text{Interface}} -P_2 \mathbf{n} \, ds \quad \text{Équation IV:7}$$

Action conjuguée du liquide, du capillaire et du gaz sur l'interface :

$$\int_{\text{Bord}} \gamma \mathbf{t} \, dl \quad \text{Équation IV:8}$$

avec  $\mathbf{t}$  tangente à l'interface fluide/gaz dans le plan normal à l'arête commune au trois phases (fig. IV-5).

La projection de l'équation d'équilibre suivant la direction de la génératrice du cylindre, dirigée par le vecteur  $\mathbf{v}$  (fig. IV-5) donne :

$$\Delta P \cdot \iint_{\text{Interface}} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} \, ds + \gamma \cos(\theta) \cdot \int_{\text{Bord}} dl = 0 \quad \text{Équation IV:9}$$

Soit  $S_p$ , la section mouillée (projection de l'interface sur le plan normal à la génératrice de direction  $\mathbf{v}$ ) et  $P_m$  le périmètre mouillé :

$$S_p = \iint_{\text{Interface}} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} ds$$

$$P_m = \int_{\text{Bord}} dl$$

**Équation IV:10**

La notion de rayon hydraulique est souvent utilisée dans les études d'écoulement dans les conduites saturées ou à surface libre. Le rayon hydraulique est défini comme étant le rapport de la superficie de la section mouillée sur la longueur du périmètre mouillé. Le diamètre hydraulique  $\Phi$  est défini comme étant quatre fois le rayon hydraulique. Ainsi, par exemple, dans le cas d'un cylindre de section circulaire saturé, le diamètre hydraulique est égal au diamètre du tube. Compte tenu des définitions précédentes, la pression capillaire (saut de pression de part et d'autre de la surface libre du liquide)  $P_c$  peut s'écrire pour un capillaire de forme quelconque :

$$P_c = P_{\text{liquide}} - P_{\text{gaz}} = \frac{4 \cdot \gamma \cdot \cos(\theta)}{\Phi}$$

**Équation IV:11**

Revenons maintenant à l'intrusion d'un fluide non mouillant dans un milieu poreux. Une variation de pression (notée  $dP$ ) au sein du fluide va engendrer une variation de volume de liquide dans la matrice poreuse et une variation de la surface de contact structure/liquide.

Nous estimons ces variations de volume par :

$$dV_m = S_p \frac{dP}{\rho g}$$

$$dS_m = P_m \frac{dP}{\rho g}$$

**Équation IV:12**

avec :  $S_m$ , la surface de l'interface entre le fluide et la structure,  
 $V_m$ , le volume de fluide ayant pénétré la structure,  
 $g$ , l'action de la pesanteur terrestre,  
 $\rho$ , la masse volumique du liquide.

Soit  $\varepsilon(P)$  la fonction de porosité cumulée ; elle est égale au rapport du volume de fluide ayant pénétré dans la structure à la pression  $P$  sur le volume total de la structure. Une variation infinitésimale de la porosité cumulée s'écrira :

$$d\varepsilon(P) = \frac{dV_m(P)}{V_T}$$

**Équation IV:13**

En utilisant l'expression de  $dV_m$  (Éq. IV-12), l'équation n° IV-13 devient :

$$d\varepsilon(P) = \frac{S_p}{V_T} \frac{dP}{\rho g} \quad \text{Équation IV:14}$$

La surface spécifique volumique est définie comme étant le rapport de la surface de la structure par le volume total du matériau poreux. Ainsi, comme précédemment, la variation de surface spécifique est reliée au périmètre mouillé  $P_m$  :

$$dS_v(P) = \frac{dS_m}{V_T} = \frac{P_m}{V_T} \frac{dP}{\rho g} \quad \text{Équation IV:15}$$

Il ne reste plus qu'à relier cette équation avec la définition du diamètre hydraulique et avec l'expression IV-13 pour calculer la surface spécifique volumique à l'aide des mesures issues du porosimètre :

$$dS_v(P) = \frac{4}{\Phi} d\varepsilon(P) \quad \text{Équation IV:16}$$

Ainsi, connaissant le diamètre hydraulique en fonction de la porosité cumulée, la surface spécifique volumique peut être évaluée.

## 2.2 Le porosimètre à mercure.

Le paragraphe précédent a posé les bases de la porosimétrie. Elles reposent sur la relation entre le diamètre hydraulique caractérisant la taille des pores de la matrice poreuse et la pression du fluide envahisseur.

### 2.2.a Le matériel.

Le porosimètre utilisé pour nos essais est le modèle PMI 30K-A-1 conçu par Porous Media Incorporation (PMI). Ce porosimètre est entièrement piloté par ordinateur. L'acquisition des résultats étant automatisée, l'utilisateur n'intervient que pour mettre en place l'échantillon et choisir le mode d'acquisition. Le volume de la chambre de mesure est de  $10 \text{ cm}^3$ . Le vide maximal que l'on peut obtenir est de 50 mTorr (6 Pa) (1 Torr = 1 mmHg à  $0^\circ\text{C}$ ). La pression maximale que peut imposer l'appareil est de 207 MPa.

## 2.2.b Le fonctionnement.

Le mercure est utilisé pour l'intrusion dans le milieu poreux étudié. Il est considéré comme étant sans interaction avec les matériaux testés. Ses propriétés seront supposées constantes et connues pendant les essais. Le porosimètre utilisé permet l'emploi d'un autre liquide pour l'intrusion. Toutefois, aucune expérience de ce type n'a été entreprise dans le cadre de cette thèse. La tension superficielle pour une température de 25°C est de 0,48 N.m<sup>-1</sup>. La correction de la tension superficielle en fonction de la température généralement adoptée est la suivante :

$$\gamma = \gamma_0(1 - \beta \cdot T) \quad \text{Équation IV:17}$$

avec  $\gamma_0$ , la tension superficielle pour une température de 0°C,  
 $\beta$ , le facteur de correction qui vaut dans notre cas 0,86.10<sup>-3</sup> °C<sup>-1</sup>.

L'erreur sur la tension superficielle est alors :

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\beta \cdot \Delta T}{1 - \beta \cdot T} \quad \text{Équation IV:18}$$

où  $\Delta\gamma$  représente l'incertitude sur la valeur de la tension superficielle,  
 $\Delta T$ , l'incertitude sur la température.

Si l'on considère une variation de 5°C autour d'une température de 25°C, alors l'erreur sur la tension superficielle est de 0,43%. Par conséquent, dans le cadre de notre étude, la tension superficielle est considérée comme constante et égale à 0,48 N.m<sup>-1</sup>.

L'échantillon est placé dans la chambre du porosimètre. Puis, le vide est réalisé. Une fois la pression au sein de la chambre inférieure à 100 mTorr (12 Pa), le mercure est introduit. La pression du liquide est augmentée progressivement. Pendant l'essai, la pression au-dessus de la colonne de mercure ainsi que la hauteur de cette colonne sont enregistrées. À partir de ces données, la pression dans la chambre de l'échantillon est évaluée. Le volume de mercure entrant dans la chambre est calculé à partir des variations de hauteur de la colonne de mercure. Un étalonnage préalable, i.e. un essai sans échantillon, permet de connaître exactement le volume de mercure pénétrant dans l'échantillon. Une telle méthode permet de tenir compte d'une part des déformations de la chambre, et d'autre part, de la compressibilité du mercure.

Les mesures sont alors représentées en fonction du diamètre hydraulique. En considérant que l'échantillon est saturé à la fin de l'essai, la variation de porosité cumulée (volume de mercure envahissant la structure poreuse rapportée au volume total de l'échantillon) peut être connue en dérivant le volume de mercure introduit par le diamètre hydraulique. L'analyse d'une telle courbe permet de représenter la distribution des pores en fonction de leur diamètre hydraulique. La surface spécifique volumique est évaluée en intégrant l'inverse du diamètre hydraulique par rapport à la porosité cumulée (Éq. IV:16).

La précision de l'appareil ne permet pas de mesurer des diamètres hydrauliques supérieurs à 600  $\mu\text{m}$ . Les fibres à la surface du feutre peuvent créer des pores d'une taille caractéristique de l'ordre du millimètre. Par conséquent, le porosimètre utilisé n'a pas la sensibilité suffisante pour caractériser tous les pores du feutre. Néanmoins, nous supposons que les pores internes ont une taille caractéristique inférieure à 600  $\mu\text{m}$ . Cette hypothèse sera vérifiée plus loin avec les résultats de la microtomographie.

Une cellule de compression est conçue (fig. IV-6) afin de pouvoir étudier l'influence de la déformation du feutre sur le réseau poreux. Cette cellule est réalisée en acier inoxydable. Elle permet de comprimer l'échantillon. Elle est introduite également dans la chambre pour l'étalonnage du porosimètre.

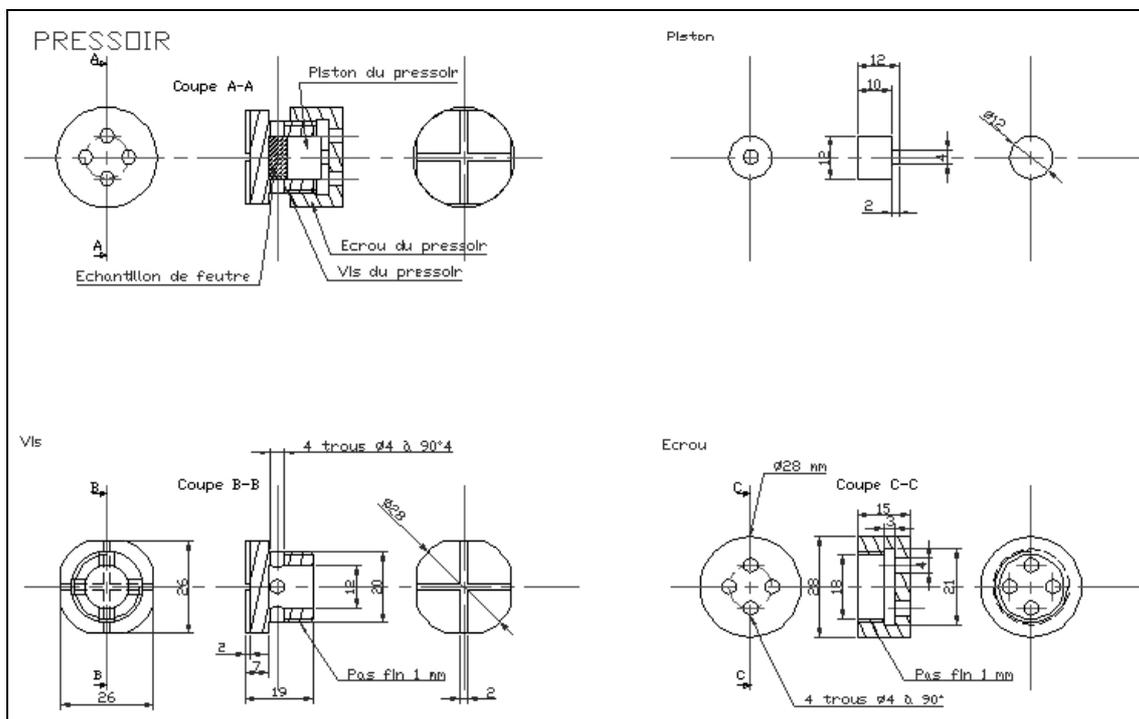


Figure IV-6 : Plan de la cellule de compression utilisée pour étudier l'influence de la déformation du feutre sur le réseau poreux.

Connaissant la masse volumique du constituant du feutre (nylon,  $1140 \text{ kg.m}^{-3}$ ), la porosité cumulée peut être évaluée à partir du volume massique de mercure injecté par la relation suivante :

$$\varepsilon(P) = \frac{\chi_m(P)}{\chi_m(P) + \frac{M}{\rho_{\text{fibres}}}} \quad \text{Équation IV:19}$$

avec  $\chi_m$ , la masse volumique de mercure injecté,  
 $M$ , la masse de l'échantillon testé,  
 $\rho_{\text{fibres}}$ , la masse volumique des fibres du feutre.

### 2.3 Protocole.

L'échantillon est pesé avant d'être placé dans la cellule de compression. L'ensemble est installé dans la chambre de mesure du porosimètre. L'appareil initialise alors son programme de mesure en effectuant le vide dans cette chambre ainsi que dans le réservoir de mercure. Lorsqu'un vide suffisant est atteint, i.e. inférieur à 100 mTorr (soit 12 Pa), le mercure remplit la cellule. Une fois le remplissage terminé, l'acquisition débute.

### 2.4 Résultats des mesures.

Les résultats présentés portent sur des feutres de différentes structures à plusieurs niveaux de compression. Lors de la compression des feutres, la distribution des pores se déplace vers les valeurs de diamètre hydraulique plus faibles (fig. IV-7). Ce comportement a déjà été trouvé dans les travaux de Rebenfeld (Rebenfeld L. et Miller B. 1995).

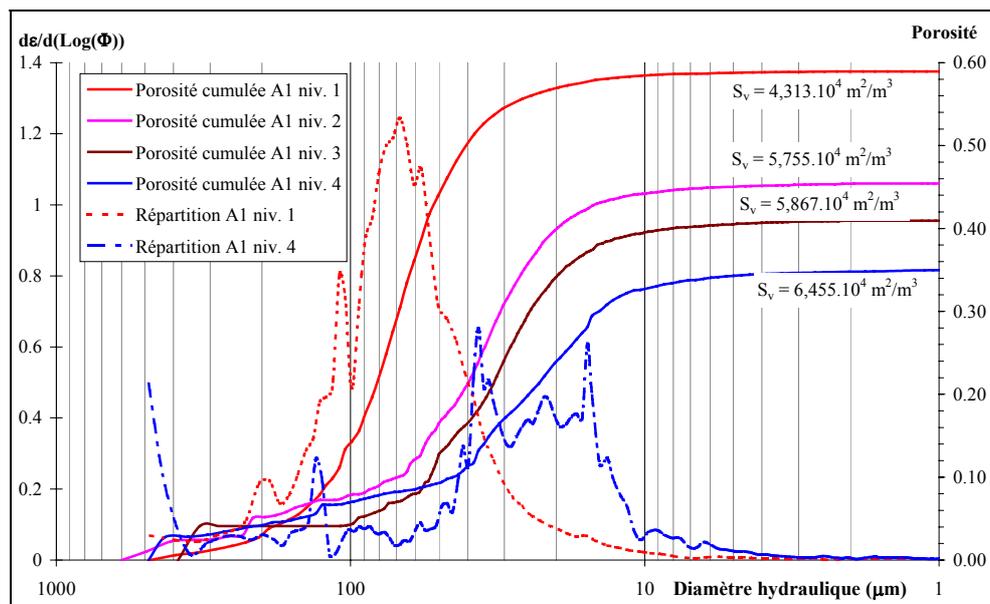


Figure IV-7 : Résultats des mesures issues du porosimètre sur le feutre A1. Les courbes continues représentent la porosité cumulée du feutre en fonction du diamètre hydraulique. Les courbes en pointillés représentent les distributions des pores du feutre en fonction de leur diamètre hydraulique pour différents niveaux de déformation (représentés par la porosité finale mesurée). Niv. 1 à 4 représente le niveau croissant de déformation.

Le tableau 10 ci-après regroupe les résultats des mesures au porosimètre pour tous les feutres testés. Le diamètre moyen des fibres est évalué à chaque niveau de déformation à l'aide de la relation IV:20. Cette relation entre surface spécifique volumique du réseau poreux et la surface spécifique de la structure est obtenue en négligeant le contact entre les fibres.

$$S_v = S_o(1 - \varepsilon)$$

$$S_v = \frac{4}{d_f}(1 - \varepsilon) \quad \text{Équations IV:20}$$

avec  $S_o$ , la surface spécifique volumique des fibres constituant le feutre,

$\overline{d_f}$ , le diamètre moyen des fibres constituant le feutre.

Les valeurs du diamètre moyen des fibres issues des mesures des feutres A1, A2, A3 et A4 sont sensiblement constantes au cours de la compression de ces feutres (tableau 10). Au contraire, le diamètre moyen évolue beaucoup dans le cas du feutre B1 (tableau 10). Ceci tend à montrer que les aires de contact entre fibres ne sont pas négligeables pour l'étude de la surface spécifique du feutre B1.

Feutre	Porosité mesurée au porosimètre	Surface spécifique volumique mesurée au porosimètre ( $m^2/m^3$ )	Diamètre hydraulique moyen ( $\mu m$ )	Diamètre moyen des fibres calculé avec la surface spécifique $S_o$ mesurée au porosimètre ( $\mu m$ )
A1	0,36	$6,45 \cdot 10^4$	21,7	39,69
	0,41	$5,87 \cdot 10^4$	27,9	40,20
	0,45	$5,76 \cdot 10^4$	31,5	38,19
	0,59	$4,31 \cdot 10^4$	54,7	38,05
A2	0,53	$5,40 \cdot 10^4$	39,2	34,81
	0,57	$5,59 \cdot 10^4$	40,7	30,77
A3	0,43	$7,08 \cdot 10^4$	24,3	32,20
	0,57	$5,44 \cdot 10^4$	41,9	31,62
A4	0,51	$5,57 \cdot 10^4$	36,6	35,19
	0,58	$5,62 \cdot 10^4$	41,3	29,89
B1	0,50	$5,54 \cdot 10^4$	36,1	36,10
	0,59	$4,39 \cdot 10^4$	53,8	37,36
	0,61	$3,13 \cdot 10^4$	80,0	49,84

**Tableau 10 : Résultat des mesures effectuées au porosimètre à mercure. Le diamètre moyen des fibres est évalué en négligeant l'aire de contact entre les fibres.**

Pour le feutre A1, les contacts entre fibres étant négligeables, la relation IV:20 peut décrire l'évolution de la surface spécifique volumique du feutre avec la compression. La surface spécifique volumique  $S_o$  des fibres est alors trouvée égale à  $10,2 \cdot 10^4 m^2/m^3$ . Le coefficient de corrélation est alors de 0,978. Le diamètre moyen des fibres évalué à partir des mesures expérimentales est de 39  $\mu m$ .

Si l'on considère le diamètre des fils et des fibres utilisés dans la conception du feutre, la surface spécifique volumique est généralement évaluée ainsi (Vermeersch O. G. 1997) :

$$S_o = 4 \frac{\sum_i \frac{m_i}{\rho_i D_{Fi}}}{\sum_i \frac{m_i}{\rho_i}} \quad \text{Équation IV:21}$$

avec  $m_i$ , la masse des fibres  $i$ .

$\rho_i$ , la masse volumique du matériau constituant les fibres  $i$ .

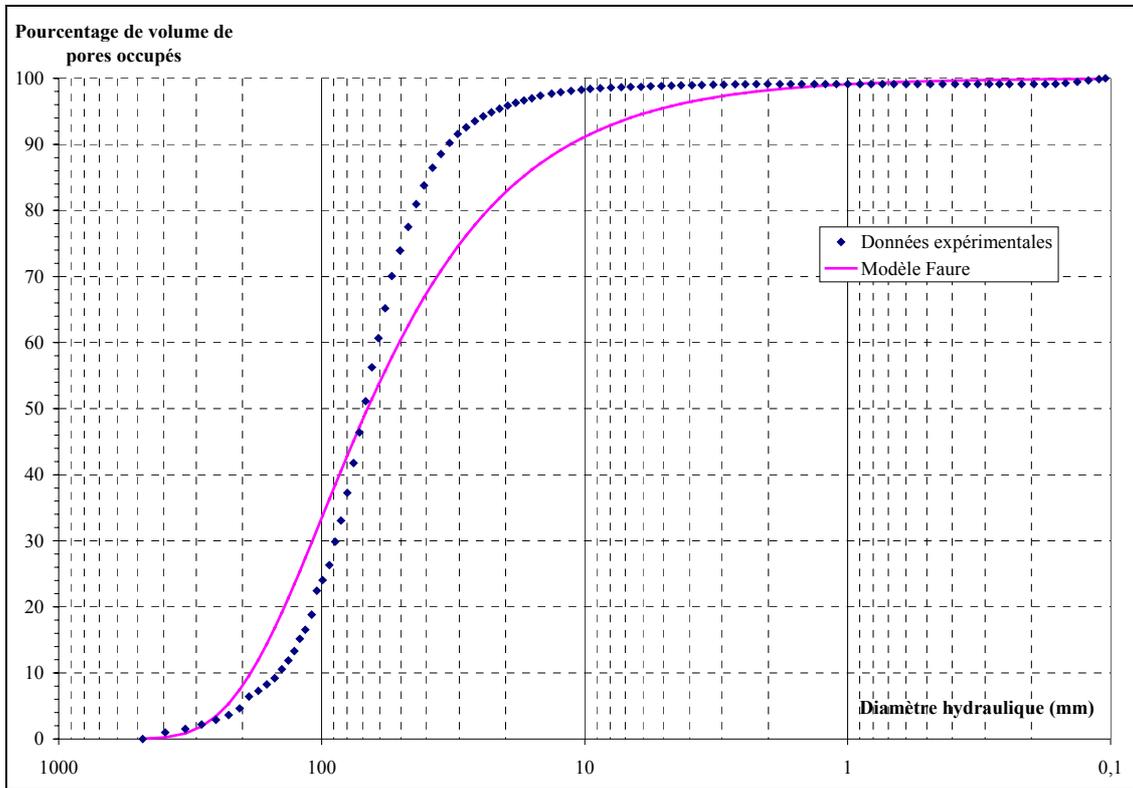
$D_{Fi}$ , le diamètre des fibres  $i$ .

L'application de cette relation aux données connues pour les matériaux composant le feutre A1 permet d'évaluer la surface spécifique volumique  $S_o$  à  $9,1 \cdot 10^4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Ce qui est très proche de la valeur mesurée avec la porosimétrie au mercure. Le diamètre moyen des fibres correspondant à  $S_o$  précédemment calculé est de  $44 \mu\text{m}$ . Cette comparaison des surfaces spécifiques volumiques valide nos essais effectués avec le porosimètre.

Les caractéristiques des voiles sont prédominantes dans l'évaluation de la surface spécifique volumique. Il est alors intéressant de comparer les résultats du porosimètre avec un modèle validé pour un textile non-tissé aiguilleté. Faure (Faure Y.-H. 1988) propose un modèle de distribution des diamètres hydrauliques pour les géotextiles non tissés aiguilletés. Les paramètres de ce modèle sont : l'épaisseur du feutre ( $e$ ), son grammage ( $W$ ), le diamètre moyen des fibres le constituant ( $\Phi_f$ ), et la masse volumique des constituants ( $\rho_f$ ). La distribution notée  $\Gamma(\Phi)$  (où  $\Phi$  correspond au diamètre hydraulique du pore) correspond au pourcentage de volume de pores dont le diamètre est supérieur à  $\Phi$ . Ce modèle est donné par la relation :

$$\Gamma(\Phi) = \left( \frac{4 \cdot W \cdot \Phi}{\Phi_f (4W + 2 \cdot \pi \cdot e \cdot \rho_f)} + 1 \right)^{\frac{2 \cdot e}{\Phi_f}} \cdot \exp \left( - \frac{4 \cdot W \cdot \Phi}{\pi \cdot \Phi_f^2 \cdot \rho_f} \right) \quad \text{Équation IV:22}$$

Ce modèle est comparé avec les résultats du feutre A1 (fig. IV-8). Le diamètre des fibres est utilisé comme paramètre dans la régression des points expérimentaux, car le feutre n'est pas composé uniquement de fibres mais de fibres et de fils. Pour chaque niveau de déformation du feutre A1, il est possible de suivre l'évolution de ce paramètre. L'épaisseur est évaluée à l'aide de l'équation III:1 et de la porosité finale mesurée. Un exemple de régression est présenté ci-dessous dans le cas du feutre A1 non déformé (fig. IV-8).



**Figure IV-8 : Comparaison des données expérimentales issues des mesures au porosimètre à mercure avec le modèle de distribution des diamètres hydrauliques de Faure.**

La relation de Faure modélise assez bien les données expérimentales. Le coefficient de corrélation pour cet exemple est de 0,961. La valeur du diamètre des fibres utilisée comme paramètre dans ce cas est de 177  $\mu\text{m}$ . La même approche est faite avec tous les feutres A1 à A4 pour différents niveaux de déformation. Les résultats concernant le coefficient de corrélation, le paramètre du modèle, le diamètre hydraulique moyen mesuré, la surface spécifique et la porosité totale mesurée sont regroupés dans le tableau 11.

Feutre	Porosité mesurée au porosimètre	Diamètre moyen des fibres calculé avec la surface spécifique $S_o$ mesuré au porosimètre ( $\mu\text{m}$ )	Paramètre du modèle de Faure ( $\mu\text{m}$ )	Coefficient de corrélation
A1	0,36	39,69	142	0,969
	0,41	40,20	140	0,963
	0,45	38,19	150	0,963
	0,59	38,05	177	0,961
A2	0,53	34,81	165	0,965
	0,57	30,77	165	0,947
A3	0,43	32,20	145	0,979
	0,57	31,62	160	0,949
A4	0,51	35,19	155	0,966
	0,58	29,89	165	0,952
B1	0,50	36,10	245	0,980
	0,59	37,36	250	0,970
	0,61	49,84	275	0,950

**Tableau 11 : Comparaison du diamètre moyen des fibres évalué avec les mesures du porosimètre avec les valeurs du paramètre dans le modèle de Faure. Le coefficient de corrélation renseigne sur la qualité de la modélisation.**

Le modèle de Faure a été validé pour des géotextiles non tissés aiguilletés. Ces matériaux ne possèdent pas de canevas contrairement aux feutres utilisés dans les presses de papeterie. Cette différence entre les matériaux permet d'expliquer l'écart entre les valeurs des diamètres hydrauliques mesurées au porosimètre à mercure et le paramètre du modèle de Faure.

Alors que les mesures au porosimètre montrent que le diamètre moyen des fibres reste constant au cours de la déformation du feutre, le paramètre du modèle de Faure représentant le diamètre des fibres doit être réévalué pour chaque niveau de compression. Par conséquent, ce modèle ne permet pas de modéliser correctement l'évolution de la distribution des pores avec la compression du feutre.

### IV.3 Microtomographie.

Parmi toutes les techniques non-destructives permettant d'étudier la structure de matériaux, la tomographie par rayon X est très répandue dans le domaine médical et industriel. Si MacGregor (MacGregor M. A. 1989) préconise dès 1989 l'utilisation de moyens modernes, dont notamment la tomographie, pour caractériser l'influence du pressage sur la feuille, il faut attendre 2001 pour les premières reconstructions tridimensionnelles de la feuille de papier (Antoine C., Nygard P. & al. 2001; Goel A., Tzanakakis M. & al. 2001 ; Reverdy N., Bloch J.-F. & al. 2001 ). Ce paragraphe fait la synthèse des caractérisations tridimensionnelles existantes et décrit la méthode utilisée pour la caractérisation de nos échantillons de feutre.

#### 3.1 Introduction.

Les premiers travaux d'analyse structurale portant sur le feutre ou le papier utilisent la technique des lamelles (Chevallier P. 1988). L'échantillon est découpé en lamelle la plus finement possible. Puis chaque lamelle est étudiée. Cette technique destructive est très laborieuse. La reconstruction de la structure à partir de cette méthode est imprécise du fait de l'épaisseur des lamelles et de la matière retirée pendant le découpage et le polissage. Cependant, des améliorations récentes concernant le découpage autorise une précision de 0,1  $\mu\text{m}$  entre chaque lamelle (Kerschmann R. 2001).

Dans le domaine de l'imagerie médicale, la résonance magnétique nucléaire (RMN) est utilisée pour l'étude du cerveau. Cette technique repose sur les propriétés magnétiques de certains noyaux d'atome (en particulier hydrogène, carbone et azote). L'échographie repose sur l'effet Doppler. Des ultrasons se propagent dans les tissus et sont réfléchis par les interfaces présentant des propriétés acoustiques différentes. La tomographie par absorption de rayons X est largement utilisée en imagerie médicale. Cette technique permet la reconstruction bidimensionnelle ou tridimensionnelle d'organismes biologiques. L'utilisation d'un rayonnement synchrotron et d'outils adaptés, permettent d'améliorer très nettement la résolution de l'imagerie qui atteint l'ordre du micron (Cazeaux J. et Despujols J. 1992). On parle alors de microtomographie.

### 3.2 La microtomographie aux rayons X.

#### 3.2.a Preamble.

Le « European Synchrotron Radiation Facilities » (ESRF), a ouvert ses portes en 1992. Cet appareil appartient à la troisième génération de synchrotron. Il accueille 400 scientifiques et 2000 utilisateurs par an. L'anneau où sont accélérés les électrons, a un périmètre de 1 km. En périphérie sont disposées les lignes sur lesquelles sont conduites les expériences (fig. IV-9). Les essais présentés dans ce chapitre ont été effectués sur la ligne ID19 dédiée à la microtomographie et à la topographie.

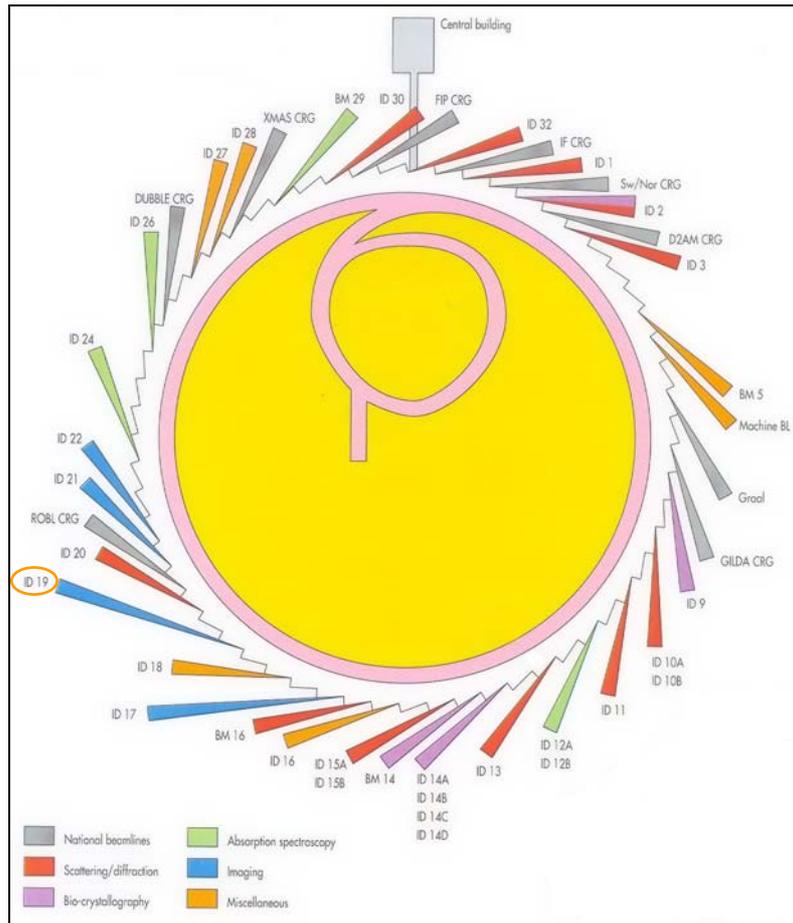


Figure IV-9 : Plan des installations du synchrotron (D'après brochure de la présentation de l'ESRF).

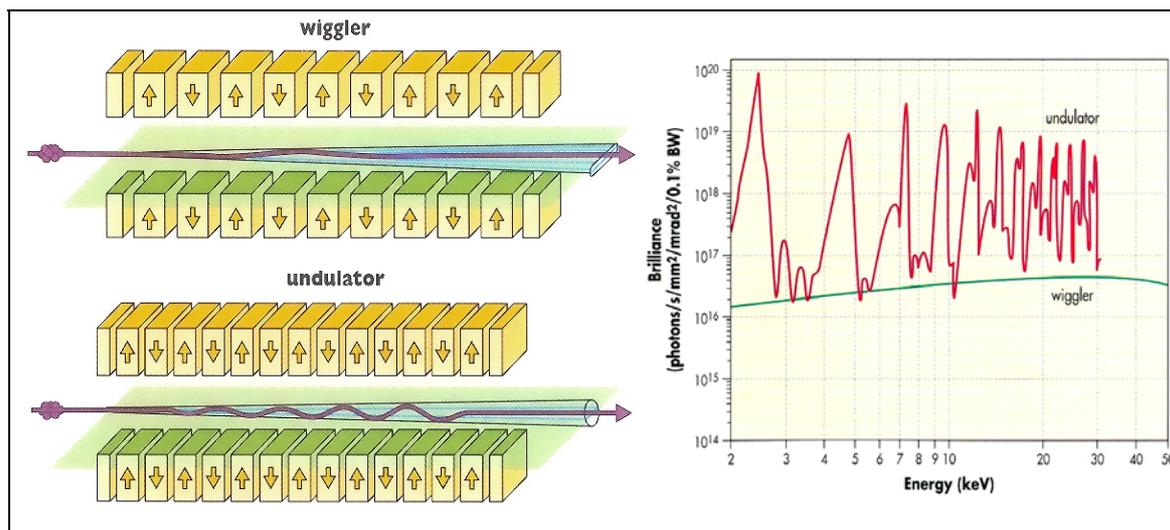
#### 3.2.b Génération des rayons X.

L'accélération d'un électron provoque l'émission d'un rayonnement électromagnétique appelé rayon X. Ainsi, un électron dévié par un champ magnétique produit un rayonnement qui se propage suivant la tangente de la trajectoire au point d'émission.

L'étude d'un matériau industriel tel que le papier ou le feutre requiert des rayons X de forte énergie (ou longueur d'onde courte) seuls capables de traverser ces matériaux. Afin de produire un rayonnement de très haute énergie, des électrons sont placés dans un champ magnétique leur imposant une trajectoire quasiment circulaire. Le débit d'électrons peut alors atteindre 200 mA (soit un débit d'environ  $12,5 \cdot 10^{19}$  électrons par seconde).

Des systèmes magnétiques sont conçus pour contrôler les caractéristiques du rayonnement. Ce sont les « wigglers » et les « undulators » (fig. IV-10). Créant un champ magnétique alternatif, ces appareils obligent les électrons à osciller sur leur trajectoire. La lumière ainsi créée est la superposition des rayonnements nés de chaque oscillation. Les « wigglers » permettent de produire un rayon X dont le spectre d'énergie est continu. L'intensité du rayon est alors proportionnelle au nombre d'aimants employés. Dans les « undulators », l'inversion du champ magnétique est beaucoup plus fréquente que dans les « wigglers », augmentant ainsi le nombre de déviations des électrons. Les rayonnements créés par les oscillations de trajectoire interagissent entre eux. Le spectre énergétique résultant dans ce cas est discontinu (fig. IV-10). Il est alors possible de sélectionner la longueur d'onde du rayon X.

La source d'émission des rayons X est située à environ 145 m de la cabine de mesure de la ligne ID19. Les photons composant le faisceau ont alors une trajectoire parallèle en entrant dans la cabine. Avant de traverser l'échantillon, le rayon passe d'abord dans un monochromateur (par exemple un cristal parfait) pour que les ondes composant le rayon soient en phase.



## 3.2.c Atténuation du rayonnement.

Lorsqu'un photon pénètre dans un milieu matériel, il interagit avec les atomes constituant ce milieu différemment suivant son niveau d'énergie. Pour les faibles niveaux d'énergie, il peut interagir avec un électron. Un des phénomènes suivants subvient alors : l'effet photo-électrique ou l'effet Compton. Pour des niveaux d'énergie plus élevés, il peut interagir avec le noyau de l'atome, le phénomène de matérialisation ou une réaction nucléaire peut apparaître. Le paragraphe ci-après décrit ces différents phénomènes, classés par ordre d'importance de l'énergie transmise à l'atome (de l'énergie la plus faible à la plus importante) :

- ⊗ **La diffusion simple** : Le photon incident, d'énergie  $E$ , est ré-émis par l'atome avec la même énergie mais dans une direction différente. Ce phénomène de faible niveau énergétique n'entre pas dans le cadre de la tomographie et n'est pas développé.
- ⊗ **L'effet photo-électrique** : l'atome en équilibre (état fondamental) absorbe la totalité de l'énergie du photon (le photon n'existe alors plus). L'énergie excédentaire de cette absorption est transférée à un électron qui est éjecté de sa couche électronique  $i$  (fig. IV-11). On parle d'ionisation de l'atome. L'électron est éjecté avec l'énergie cinétique correspondant à l'énergie du photon incident diminuée de l'énergie de liaison  $W_i$ , ou encore  $E_a = E - W_i$ . L'énergie cinétique de l'électron sera alors absorbée par le milieu au voisinage de l'interaction. Le retour de l'atome à son état fondamental peut se faire de différentes façons conduisant à l'émission de photon dit photon de fluorescence ou bien par éjection d'un électron dit électron d'Auger (Dutreix J., Desgrez A. & al. 1993).

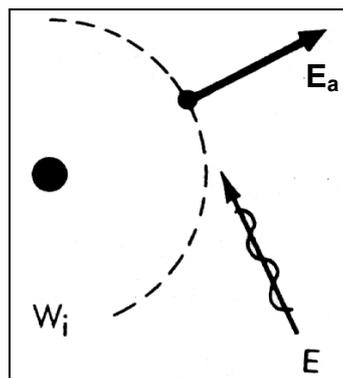


Figure IV-11 : Illustration de l'ionisation de l'atome.

- ⊗ **L'effet Compton** : Un photon incident, d'énergie  $E$  interagit avec l'atome qui éjecte un électron. Il transfère à cette particule une énergie  $E_a$ . Le reste de l'énergie,  $E_s$  est emporté par un photon diffusé. La conservation de l'énergie impose que  $E = E_a + E_s$ . Ce transfert doit également satisfaire la conservation de quantité de mouvement. Ceci impose certaines relations dites de Compton entre les énergies et les directions des différentes émissions (ces relations ne sont pas décrites dans ce travail).

L'énergie transférée à l'électron, sous forme d'énergie cinétique, sera absorbée par le milieu au voisinage de l'interaction. La quantité d'énergie transférée à l'électron est très différente suivant la valeur de  $E$ . Si  $E$  est très élevée, une grande partie est transférée à l'électron. Si  $E$  est faible, le photon diffusé repart avec presque toute l'énergie.

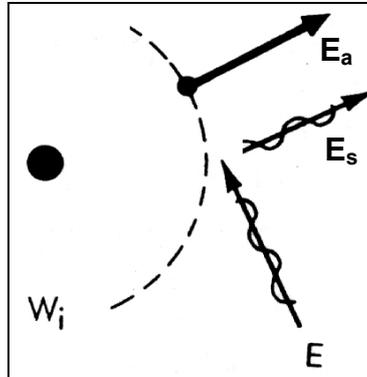


Figure IV-12 : Illustration de l'absorption d'un photon dans l'effet Compton.

- ⊗ **La matérialisation** : Au voisinage du noyau atomique règne un champ électrique intense. Lorsqu'un photon incident pénètre dans ce champ, il peut se matérialiser en deux particules électroniques, l'une positive (positron), l'autre négative (électron). Les deux particules vont être éjectées et leur énergie va être absorbée par le milieu voisin de l'interaction de la même manière excepté que la trajectoire du positron se terminera par l'émission d'un photon d'annihilation, fruit de la rencontre du positron avec un électron.
- ⊗ **La réaction nucléaire** : l'absorption du photon et de son énergie par la structure atomique entraîne un état très instable menant à la désintégration de l'atome (en créant un atome isotope de l'atome initial) et l'émission d'un neutron. Ce phénomène n'est possible que pour des photons de très hauts niveaux d'énergie. Ce phénomène n'entre pas dans le cadre de la tomographie et n'est donc pas développé ici.

Lorsqu'un rayon X pénètre dans un milieu matériel, les photons le constituant disparaissent progressivement. Cette disparition de photons incidents est appelée atténuation. Ce phénomène est causé par l'interaction des photons avec les particules constituant le milieu matériel. Le coefficient d'atténuation définit la probabilité qu'un photon incident disparaisse lors de son passage à travers le milieu matériel. Soit  $N$  photons incidents, tous d'énergie  $E$ , traversant une section matérielle d'épaisseur infinitésimale  $dx$ . Il disparaît un nombre  $dN$  de photons incidents à cause des interactions précédemment décrites.

Ce nombre de disparitions est proportionnel au nombre de photons incidents  $N$ . Il vérifie alors la loi dite loi de Lambert-Beer ou loi d'atténuation :

$$dN = -\mu N dx \quad \text{Équation IV:23}$$

Dans cette relation, le signe moins désigne une diminution du nombre de photons. Le coefficient  $\mu$  est appelé coefficient d'atténuation linéaire ou linéique.

Dans la gamme d'énergie utilisée pour l'imagerie microtomographique, seuls les effets photo-électrique, Compton et de matérialisation sont prédominants. Le coefficient  $\mu$  dépend de l'importance de ces trois effets. Pour décrire la variation de l'atténuation (fig IV-13), il est pratique de séparer ce coefficient en plusieurs termes comme suit :

$$\mu = \tau + \sigma + \pi \quad \text{Équation IV:24}$$

avec  $\tau$ ,  $\sigma$  et  $\pi$ , respectivement les coefficients linéiques d'atténuation des effets photo-électrique, Compton et de matérialisation.

Le coefficient  $\tau$  de l'effet photo-électrique diminue rapidement lorsque l'énergie  $E$  augmente. Au contraire, il croît rapidement lorsque  $Z$  augmente et est proportionnel à la masse volumique (Éq. IV:25).

$$\tau \propto \rho \frac{Z^4}{E^3} \quad \text{Équation IV:25}$$

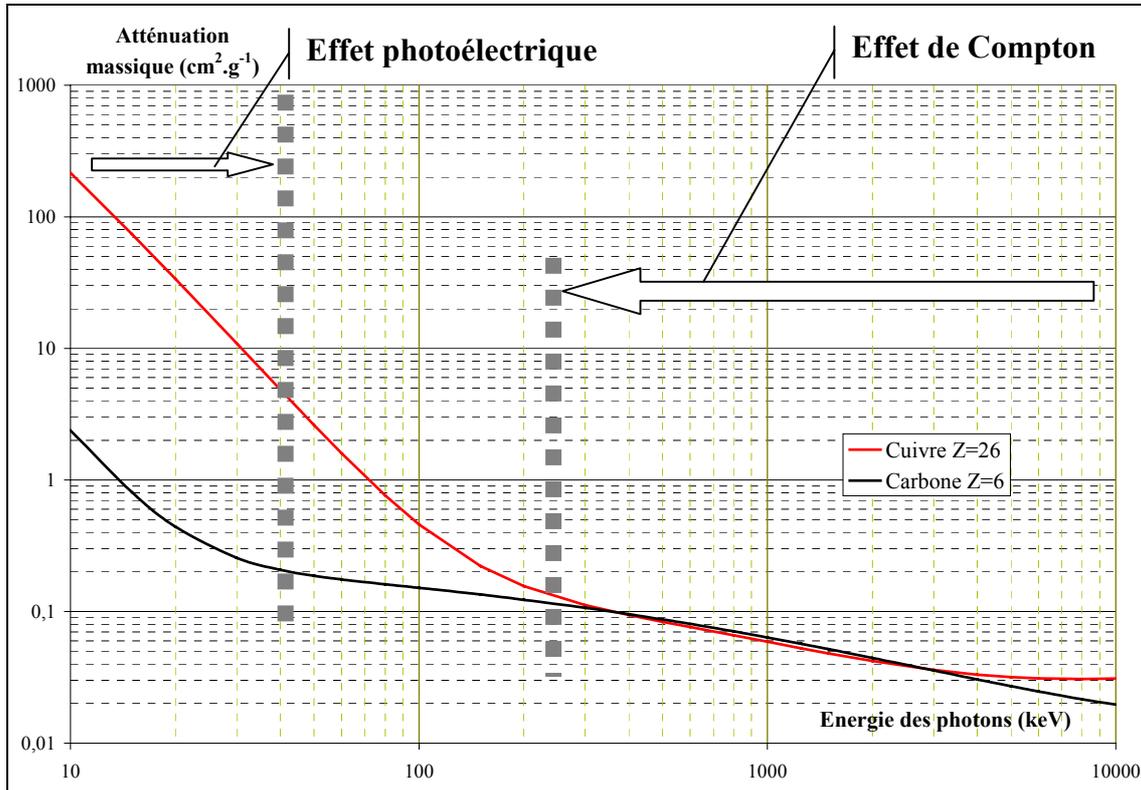
avec  $E$ , l'énergie du rayon X,  
 $Z$ , le nombre atomique des constituants du matériau,  
 $\rho$ , la masse volumique du matériau.

Le coefficient  $\sigma$  de l'effet Compton décroît lorsque l'énergie  $E$  augmente. Il est proportionnel à la masse volumique du milieu matériel et ne dépend pas du numéro atomique. Ainsi le rapport  $\sigma$ /masse volumique ne dépend que de  $E$  et est identique à tous les milieux matériels (Éq. IV:26).

$$\sigma \propto \frac{\rho}{E^2} \quad \text{Équation IV:26}$$

Le coefficient  $\pi$  de matérialisation est nul lorsque  $E$  est inférieure à 1,02 MeV. Puis il croît avec  $E$  et  $Z$  et il est proportionnel à la masse volumique du milieu.

La comparaison des trois coefficients pour différents niveaux d'énergie montre que trois domaines énergétiques peuvent être définis dans lesquels un seul phénomène est prédominant sur les autres. Les domaines correspondants aux effets photo-électrique et Compton sont illustrés sur la figure IV-13.



**Figure IV-13 : Illustration de l'évolution de l'atténuation massique avec l'énergie des photons. Indication du phénomène d'atténuation prédominant.**

Le niveau d'énergie utilisé dans le cadre de nos essais est de 12 keV. Pour un tel niveau d'énergie, l'effet photoélectrique est prédominant. Ainsi le coefficient d'atténuation dépend de la densité du milieu et aussi du nombre atomique des constituants.

Dans un tel domaine énergétique, on a la relation :

$$\frac{\mu}{\rho} = K \cdot \frac{Z^4}{E^3} \quad \text{Équation IV:27}$$

avec K, une constante,

Si l'on considère l'atténuation d'un rayonnement à travers un milieu matériel pour une section infinitésimale de largeur dx, l'intégration de l'équation IV:23 pour toute l'épaisseur du matériau traversée par le rayonnement donne alors l'atténuation totale (Éq. IV:28).

$$\int_{\text{trajet}} \frac{dN}{N} = \ln\left(\frac{N_0}{N_1}\right) = - \int_{\text{trajet}} \mu dx \quad \text{Équation IV:28}$$

## 3.2.d Reconstruction.

Le bilan photonique avant et après l'échantillon pour différentes lignes d'émission permet d'établir la cartographie de l'atténuation totale. Une telle carte est appelée projection de l'atténuation. L'ensemble des projections pour toutes les valeurs angulaires constitue la transformée de Radon (1917) de la distribution volumique de l'atténuation.

Pour certains matériaux, les constituants ont des coefficients d'atténuation si proche que la distinction par reconstruction n'est pas possible (i.e. lorsque le produit  $Z^4\rho$  est identique pour les constituants du matériau). La méthode de tomographie à contraste de phase permet alors d'analyser la structure du matériau. Cette technique est basée sur le fait que lorsqu'une émission de rayonnement X traverse un milieu matériel, l'onde subit un déphasage angulaire dû à l'interaction avec les électrons (Baruchel J., Buffière J.-Y. & al. 1998; Cloetens P. 1999). Ce déphasage ne dépend que de l'énergie de l'émission et de la densité électronique.

Une fois l'acquisition des transformées de Radon faite, l'inverse de cette transformée représente la distribution volumique des coefficients d'atténuation. Pour décrire cette opération, la fonction  $p(\theta,r)$  (Éq. IV:29) est définie comme étant la projection de l'atténuation dans la direction  $\theta$  pour un décalage  $r$  par rapport à l'axe de rotation (fig. IV-14) d'une section d'un milieu matériel.

$$p(r,\theta) = \int_{x \in \text{droite}(r,\theta)} \mu(x) dx = \ln \left( \frac{N_1}{N_0} \right) \quad \text{Équations IV:29}$$

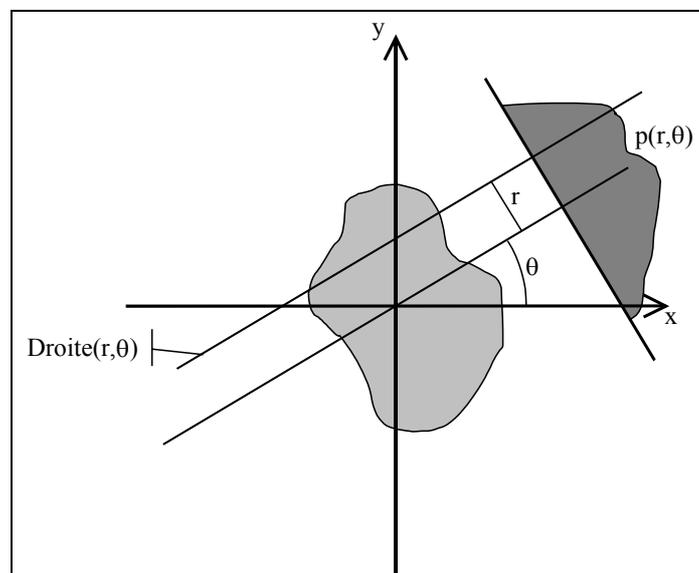


Figure IV-14 : Illustration de l'évaluation de la transformée de Radon d'une section de matériau.

La reconstruction repose sur le théorème dit de la tranche (Fourier Slice theorem). Ce théorème montre l'équivalence entre la transformée 1D de Fourier de  $p(r,\theta)$  et la transformée 2D de Fourier de la tranche correspondant à  $p(r,\theta)$ . Une condition nécessaire pour que la reconstruction soit possible est que le nombre de projections angulaires soit entre  $\pi/2$  et  $\pi/4$  fois plus grand que le nombre de pixels latéraux (i.e. condition entre les discrétisations de  $\theta$  et de  $r$ ). Par conséquent pour nos essais nous utiliserons 900 projections réparties tous les  $0,2^\circ$ . De part la discrétisation angulaire, la perte d'information pour la reconstruction augmente en s'éloignant du centre. Cette dégradation est amplifiée si l'acquisition est faite en local, i.e. l'échantillon ne rentre pas entièrement dans le champ de la caméra. Cette perte se traduit par un bruit plus important sur les bords de l'image reconstruite.

### 3.2.e Description de l'appareil d'acquisition.

L'acquisition des projections de l'atténuation totale se fait à l'aide d'une caméra CCD spécialement conçue par l'ESRF pour la microtomographie aux rayons X (Fig. IV-16). La caméra FReLoN (Fast Readout Low Noise) est un détecteur présentant une large gamme dynamique (sensibilité élevée), un faible bruit et un temps d'acquisition très court. La taille de l'image maximale acquise est de 1024 par 1024 pixels. L'optique mise en place sur la caméra CCD permet d'obtenir une résolution de  $(6,6 \mu\text{m})^2$  par pixel. La rotation de l'échantillon se fait avec un moteur pas à pas de grande précision. Le volume des données après acquisition des 900 projections est au maximum de 3,5 Go. Pour chaque ligne de pixels (fig. IV-15), il sera alors possible de reconstruire une section comme décrit dans le paragraphe précédent.

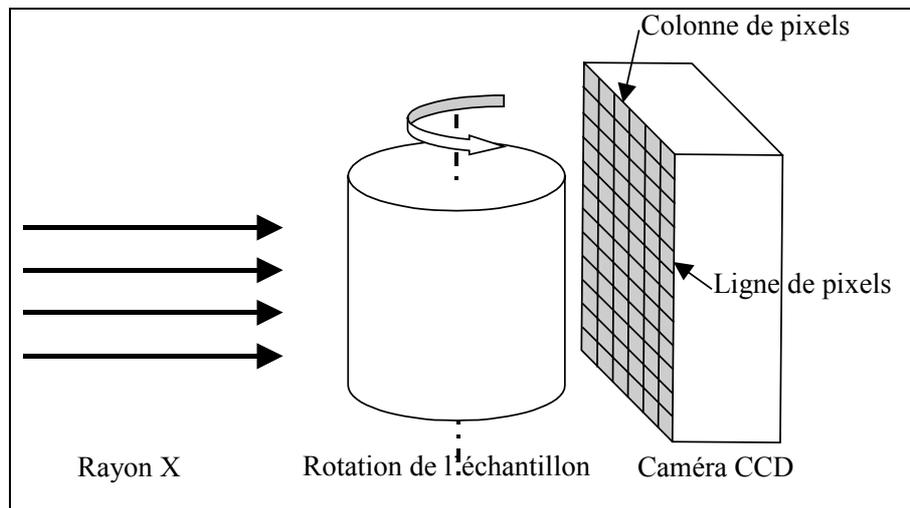


Figure IV-15 : Schématisation du processus de mesures.

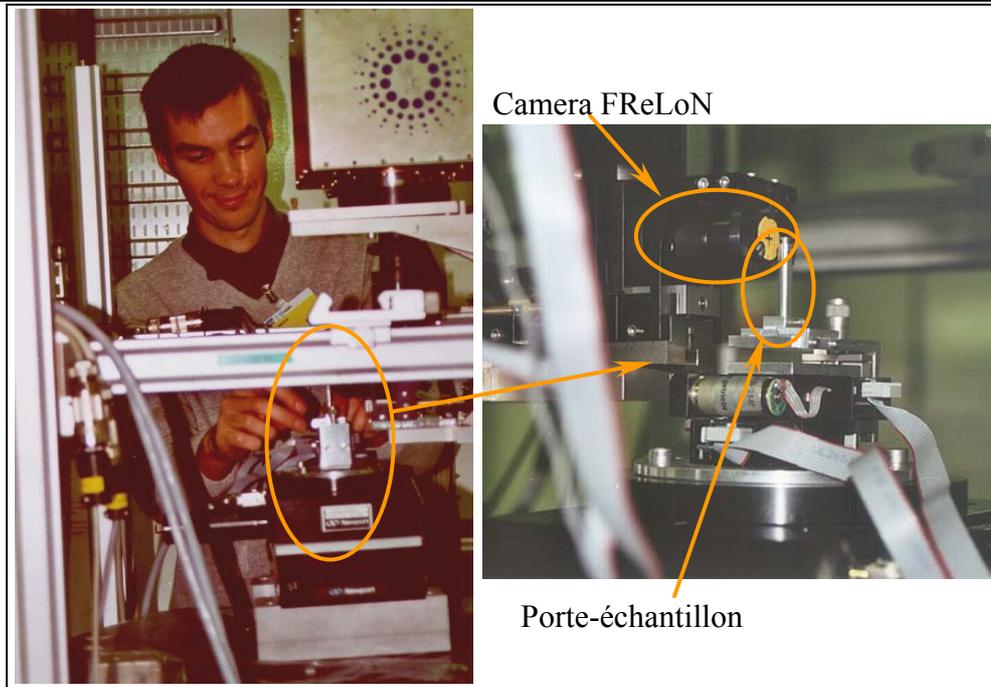


Figure IV-16 : Photographie de la caméra CCD et du porte-échantillon.

### 3.3 Acquisition et reconstruction.

#### 3.3.a Protocole.

Le diamètre maximal de l'échantillon pouvant être placé dans la cellule de compression en polyéthylène conçue pour les expériences est de 8 mm. Le découpage est effectué avec un emporte-pièce. Puis l'échantillon est mis en place dans la cellule (Fig. IV-17). De part sa conception, la cellule de compression ne peut assurer une bonne orthogonalité entre le plan moyen du feutre et l'axe de rotation de l'appareil d'acquisition. Lors des mesures, l'échantillon peut ne pas être horizontal. De plus aucun système anti-fretage n'est prévu entre le feutre et le piston presseur, l'échantillon tourne pendant la compression et aucune position ne peut être prise comme référence avant les mesures.

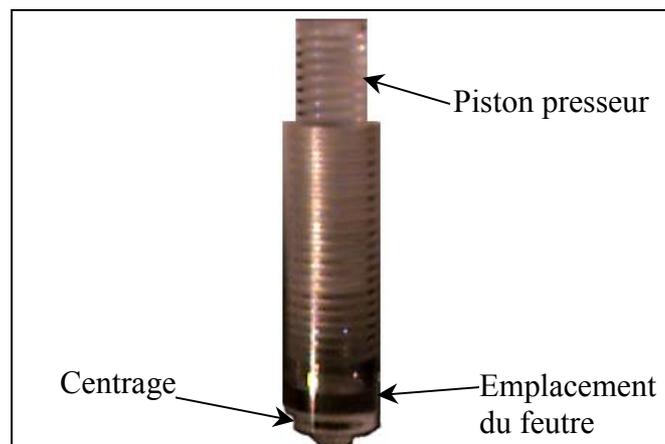


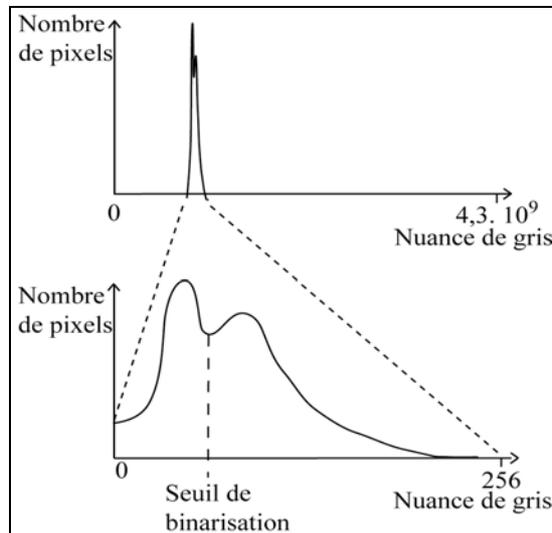
Figure IV-17: Illustration de la cellule de compression

Après avoir installé le porte-échantillon (fig. IV-16) sur l'appareil d'acquisition, la région d'intérêt dans le champ de la caméra est sélectionnée afin de limiter le volume des données. L'acquisition dure alors environ 45 min avec un rayon X d'énergie 12 keV.

### 3.3.b Binarisation.

Après acquisition des 900 projections, les mesures sont tout d'abord vérifiées par la reconstruction et la visualisation du centre d'une section, image de 512 par 512 pixels. Si l'image est satisfaisante, toutes les sections sont reconstruites. L'atténuation est alors connue pour chaque voxel (cube élémentaire généré par un pixel) constituant le volume reconstruit. La valeur de l'atténuation est stockée sous un format numérique float, i.e. codage sur 4 octets soit 32 bits. Une à deux heures de calcul sur une station de travail sont nécessaires pour l'étape de reconstruction du volume.

L'histogramme des valeurs d'atténuations ou des niveaux de gris (vocabulaire relatif à l'image reconstruite) du volume reconstruit est analysé. Un nouvel échantillonnage est effectué car la totalité des 4 294 967 296 ( $2^{32}$ ) niveaux de gris ne sont pas utilisés (fig. IV-18). L'image est alors recalculée avec 256 nuances de gris.



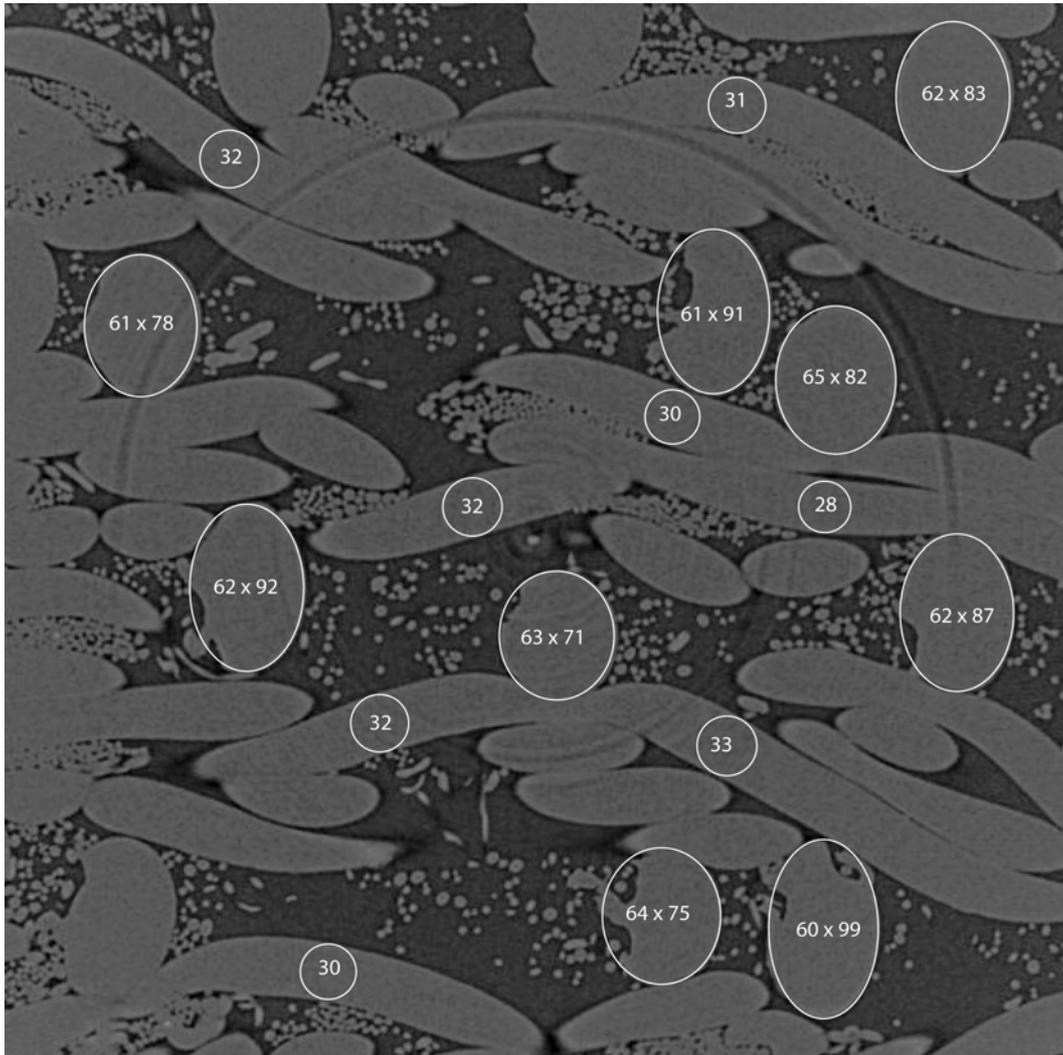
**Figure IV-18 : Étape d'échantillonnage d'un volume à partir de l'histogramme des niveaux de gris. Détermination du seuil de binarisation.**

Pour le feutre, les valeurs d'atténuations de l'air et du nylon étant bien séparées, il est possible de déterminer très distinctement à quelle phase appartient la nuance de gris. Dans la distribution des niveaux de gris échantillonnés sur 256 nuances (fig. IV-18), un maximum correspond à l'air, l'autre maximum au matériau. La binarisation de l'image s'effectue en imposant la valeur 1 tous les pixels dont la nuance de gris est supérieure à la valeur seuil (fig. IV-18) et à 0 toutes les valeurs inférieures. La reconstruction binaire du volume correspond alors au volume biphasique réel.

Les sections reconstruites sont circulaires de diamètre 1024 pixels. Cependant la qualité de la reconstruction est très médiocre en périphérie de ce disque. Ainsi, seul un carré de 582 par 582 pixels est conservé pour la binarisation.

Les fils utilisés pour le tissage du canevas des feutres A1, A2, A3 et A4 sont, dans le sens travers un mono-filament de diamètre 0,4 mm, et, dans le sens marche de la machine à papier

un multi-filament dont les fils ont pour diamètre 0,2 mm. Sur une section reconstruite (fig. IV-19) le nombre de pixels caractérisant le diamètre des fils sens marche et sens travers est mesuré.

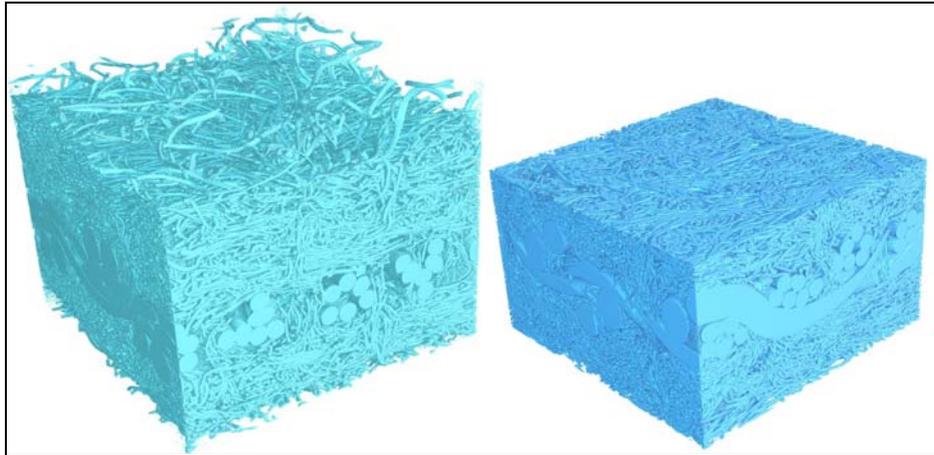


**Figure IV-19 : Reconstruction d'une section dans le canevas du feutre A1. Détermination de la taille des fils en pixels. (1 pixels équivaut à 6,6 µm)**

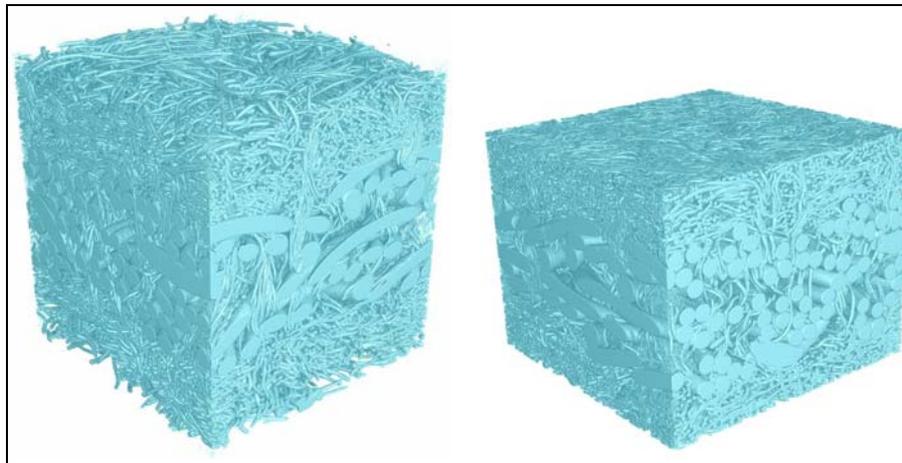
La valeur du diamètre du fil mono-filament se situe alors entre 61 et 65 pixels. Ce qui, avec une résolution 6,6 µm par pixel, correspond à l'intervalle [0,403-0,429] mm. De la même façon, l'intervalle des fils constituant le multi-filament est [0,198-0,218] mm. Cette vérification de la taille des fils valide bien la résolution de la caméra ainsi que la procédure de reconstruction. De plus on vérifie visuellement qu'aucun pore interne n'a une taille supérieure à 600 µm.

3.3.c Visualisation tridimensionnelle.

À l'aide du logiciel VGStudio 3D<sup>®</sup>, il est possible de visualiser en trois dimensions les résultats des mesures. Quelques exemples de reconstructions ont été présentés afin d'illustrer un feutre simple canevas et un feutre double canevas (fig. III-1 et 3). D'autres exemples sont présentés ci-après. L'influence de la déformation des deux types de feutres est illustrée (fig. IV-20 et 21). On notera les fibres entraînées dans le canevas lors de l'aiguilletage sur la face éclairée de la reconstruction du feutre B1 non déformé (fig. IV-21).



**Figure IV-20 : Reconstruction du feutre A1. À gauche le feutre est non déformé. À droite le feutre est déformé.**



**Figure IV-21 : Reconstruction du feutre B1. À gauche le feutre est non déformé. À droite le feutre est déformé.**

Les valeurs d'atténuations massiques pour le matériau composant les fibres du voile et pour celui composant le canevas sont assez bien séparées. Il est alors possible d'extraire le canevas du reste de la structure (fig. III-2). Dans l'exemple suivant (fig. IV-22), les fibres du voile sont enlevées. L'image présentée illustre le tissage du canevas des feutre A1 et B1. L'endommagement des fils mono-filaments par l'aiguilletage des voiles du feutre A1 est mis en évidence.

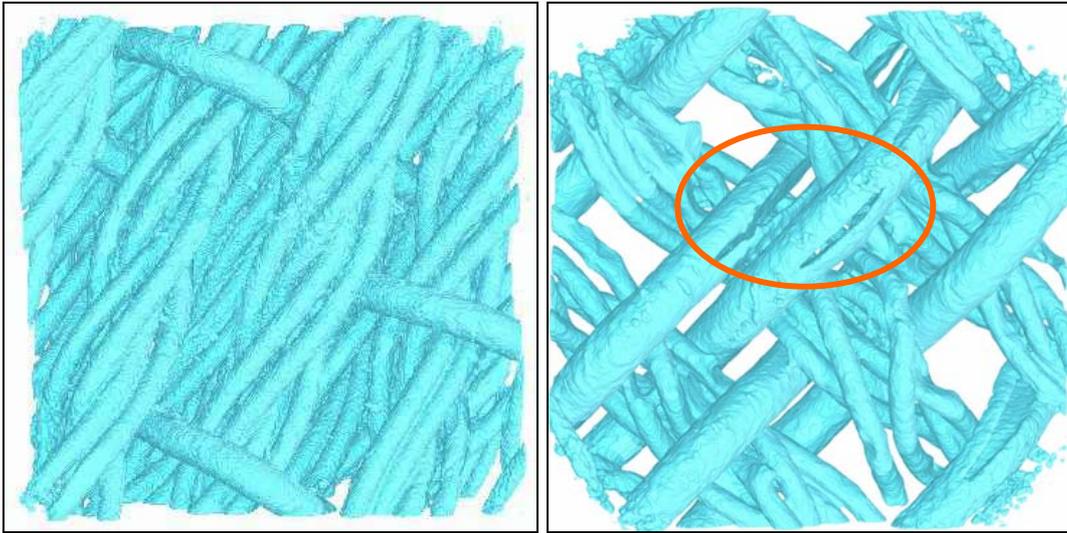


Figure IV-22 : À gauche vue de dessus du canevas du feutre B1, le diamètre des fils est de 0,2 et 0,3 mm. À droite vue de dessus du canevas du feutre A1, le diamètre des fils est de 0,2 et 0,4 mm. L'endommagement des mono-filaments du feutre A1 est mis en évidence.

### 3.4 Analyse des données.

#### 3.4.a Évaluation de la porosité.

Le choix du seuil de binarisation a été présenté dans le paragraphe IV.3.2.b (fig. IV-18). Une incertitude de quelques unités sur la sélection de la valeur est possible. L'influence du choix du seuil de binarisation est représentée figure IV-23. Elle n'est pas significative sur l'évaluation de la porosité. Le seuillage sera aussi considéré sans influence pour toutes les grandeurs que nous calculerons.

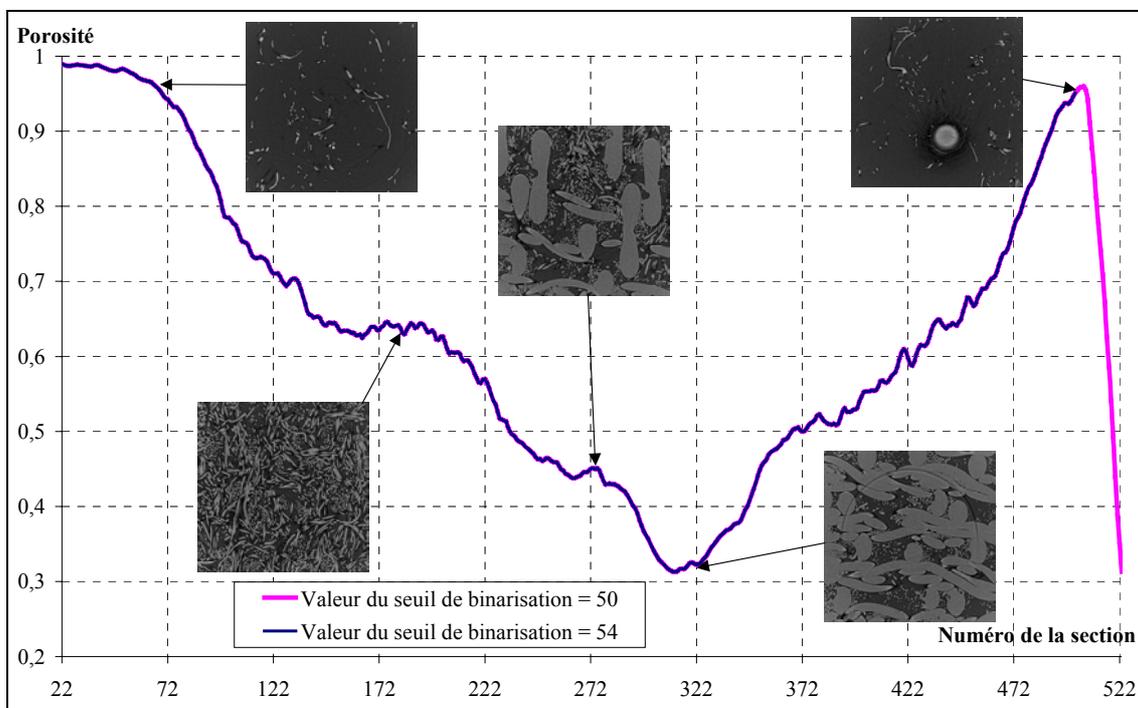


Figure IV-23 : Influence du seuil de binarisation sur la porosité du volume reconstruit de feutre A1. Illustration de la courbe par des images sections du feutre.

Des images de section de feutre illustrent les variations transversales de la porosité (fig. IV-23). La porosité est plus grande dans le voile que dans le canevas lorsque le feutre n'est pas déformé.

Lorsque la compression augmente, la porosité dans le voile diminue beaucoup alors que la capacité alvéolaire du canevas est sensiblement constante (fig. IV-24). Cependant, la porosité dans le canevas est plus faible que dans les voiles. Ceci est aussi vérifié pour le feutre B1.

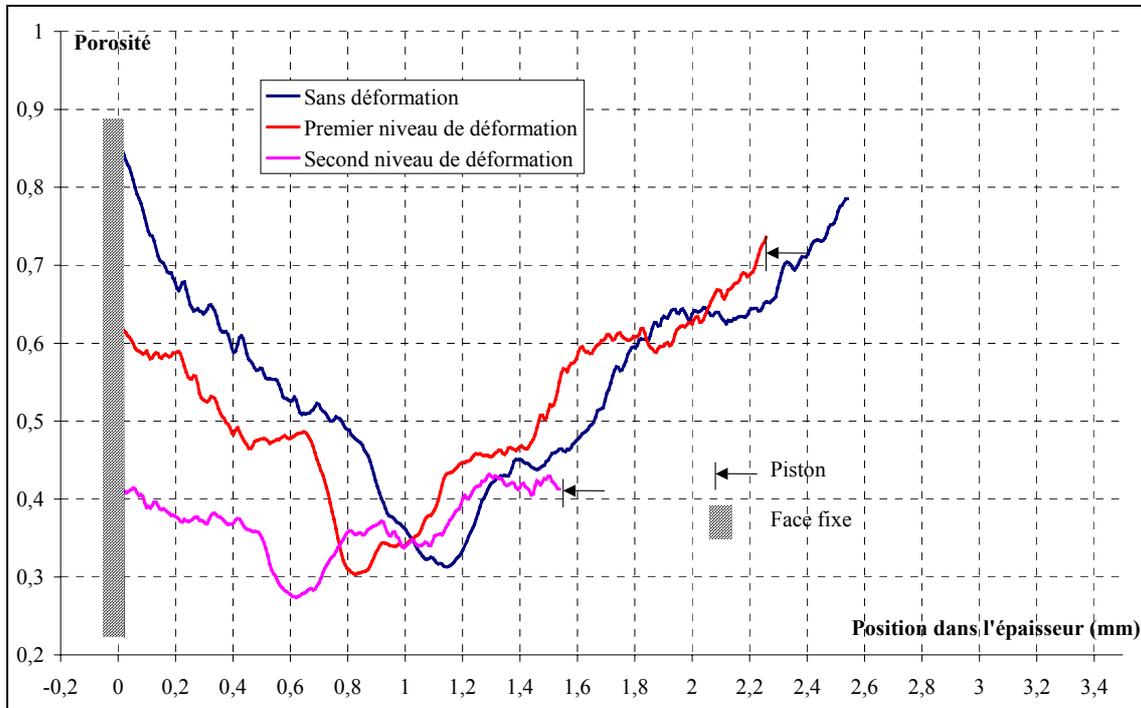


Figure IV-24 : Évolution de la porosité selon l'épaisseur lorsque le feutre est déformé.

### 3.4.b Stéréométrie.

La stéréométrie permet l'analyse géométrique tridimensionnelle de matériau dont seuls des informations bidimensionnelles (section ou projection) sont disponibles (Underwood E. E. 1970).

Dans le cadre de notre étude, cette technique est utilisée pour analyser les sections issues des résultats de la microtomographie. Pour chaque section, un faisceau de droites parallèles orientées d'un angle  $\theta$  par rapport à l'abscisse est utilisé pour calculer les grandeurs présentées ci-après. La notation  $\bar{Y}$  désigne que la grandeur Y est moyennée sur le faisceau de droite. L'utilisation de l'indice  $_L$  désigne que la variable est linéique, i.e. ramenée à l'unité de longueur. L'indice  $_\theta$  est utilisé pour indiquer que la variable est évaluée dans la direction  $\theta$ .

$\bar{P}_{L\theta}$  est le nombre moyen de point intersection de la droite test avec une interface par unité de longueur de la droite test dans la direction  $\theta$ .

✂  $\overline{L}_\theta^\alpha$  est la longueur moyenne sur tout le domaine testé des cordes dans la phase  $\alpha$  dans la direction  $\theta$ . Lorsque  $\alpha$  est remplacé par p, l'évaluation est réalisée dans les pores. Au contraire lorsque  $\alpha$  est remplacé par f, le calcul est effectué dans les fils et les fibres.

Ces grandeurs sont évaluées pour différentes orientations angulaires. La courbe correspondante tracée en coordonnées polaires met en évidence les éventuelles orientations ou symétries de la structure. Les relations de Saltikov et Tomkeieff (Équations IV:30 et IV:31) permettent d'évaluer la surface spécifique volumique. La notation  $\langle Y \rangle$  désigne que la grandeur Y est moyennée sur toutes les directions de la section.

$$S_v = 2 \cdot \langle \overline{P}_{L\theta} \rangle \quad \text{Équation IV:30 (Relation de Saltikov)}$$

$$\frac{S_v}{\varepsilon} = \frac{4}{\langle \overline{L}_\theta^p \rangle} \quad \text{ou} \quad \frac{S_v}{1-\varepsilon} = \frac{4}{\langle \overline{L}_\theta^f \rangle} \quad \text{Équation IV:31 (Relation de Tomkeieff)}$$

où  $\varepsilon$  représente la porosité.

$\overline{P}_{L\theta}$ ,  $\overline{L}_\theta^p$ ,  $\varepsilon$  et  $S_v$  sont calculés pour chaque section reconstruite et pour un angle variant de 0 à 360° par pas de 1°. Pour éviter les effets de bord causés par la forme rectangulaire de l'image un cache circulaire est employé. Seuls les pixels à l'intérieur de ce cache sont conservés. Ces calculs sont réalisés par un programme développé en langage fortran. Leur durée est d'environ une minute par section avec un microprocesseur de 514 MHz sous environnement Linux ou Windows98.

Afin de tester le programme et vérifier si les résultats sont cohérents entre eux, les relations IV:32 utilisées en stéréométrie sont évaluées avec les résultats de calculs.

$$\frac{\overline{P}_{L\theta}}{\overline{P}_{L\theta+\frac{\pi}{2}}} = \frac{\overline{L}_{\theta+\frac{\pi}{2}}^p}{\overline{L}_\theta^p} = \frac{\overline{L}_{\theta+\frac{\pi}{2}}^f}{\overline{L}_\theta^f} \quad \text{Équations IV:32}$$

Dans ce but, on pose :

$$R_i = \frac{\overline{P}_{L\theta}}{\overline{P}_{L\theta+\frac{\pi}{2}}} \quad R_p = \frac{\overline{L}_{\theta+\frac{\pi}{2}}^p}{\overline{L}_\theta^p} \quad R_f = \frac{\overline{L}_{\theta+\frac{\pi}{2}}^f}{\overline{L}_\theta^f} \quad \text{Équations IV:33}$$

Les nouvelles variables,  $R_i$ ,  $R_p$  et  $R_f$  sont alors corrélées entre elles. Cette étape est illustrée dans la figure IV-25. L'analyse des courbes (fig. IV-25) montre que les variables sont bien corrélées entre elles. Les relations (Éq. IV:33) sont bien vérifiées. La cohérence des résultats est donc satisfaisante.

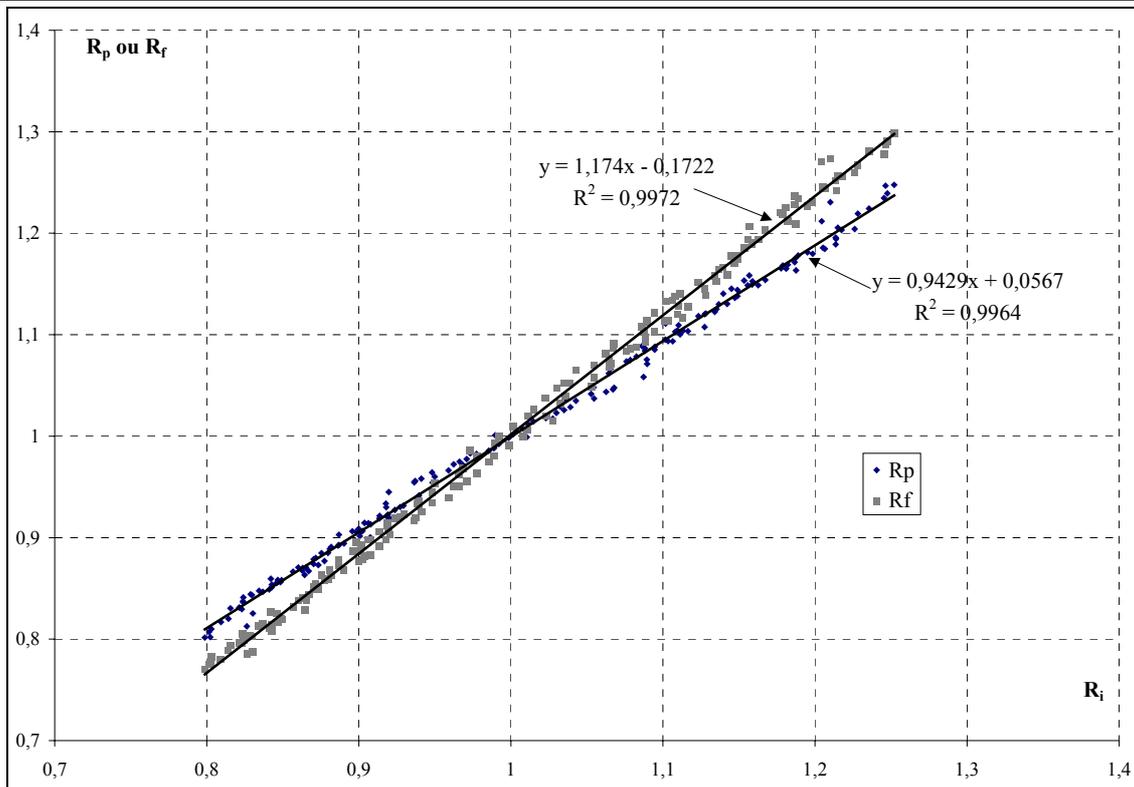


Figure IV-25 : Vérification du programme par corrélation des grandeurs  $R_i$ ,  $R_p$  et  $R_f$  entre elles.

Des exemples concernant les résultats concernant  $\overline{P}_{L0}$ ,  $\overline{L}_0^p$  et  $\overline{L}_0^f$  dans le feutre A1 non déformé sont donnés ci-après dans le tableau 12. Les variations des grandeurs  $\overline{P}_{L0}$  et  $\overline{L}_0^p$  en fonction de la direction de mesure pour des sections du voile et du canevas sont présentées.

L'analyse des figures montre que le nombre de changements d'intersection par unité de longueur est plus élevé dans le voile que dans le canevas. L'orientation du voile sens travers est bien traduite par les résultats en terme de nombre d'intersections et en terme de longueur moyenne de sécantes dans les fils et les fibres (les fils multi-filaments sont orientés préférentiellement dans le sens marche de la machine à papier). Les sécantes dans les pores ont la même orientation principale que les sécantes dans les fils et les fibres que ce soit dans le voile ou dans le canevas. La forme octogonale de l'enveloppe des sécantes dans les fils et les fibres ou dans les pores est une caractéristique commune à tous les voiles des feutres testés quel que soit le niveau de compression.

Les fibres utilisées ont un diamètre moyen de 31  $\mu\text{m}$  et une longueur de 3 mm environ. Les longueurs moyennes des sécantes dans les fibres des voiles sont comprises entre 60 et 40  $\mu\text{m}$ . La borne supérieure de  $\overline{L}_0^f$  est faible en comparaison de la longueur de la fibre. Toutefois, les fibres sont courbes et elles sont inclinées par rapport à la section reconstruite. Ceci peut expliquer la faible valeur maximum de  $\overline{L}_0^f$ .

	Dans le voile (section 203 fig. IV-23)	Dans le canevas (section 312 fig. IV-23)
Image		
Variation du nombre d'intersections par unité de longueur en fonction de l'orientation. (mm <sup>-1</sup> )		
Variation de la longueur moyenne des sécantes dans les fils et les fibres en fonction de l'orientation. (μm)		
Variation de la longueur moyenne des sécantes dans les pores en fonction de l'orientation. (μm)		

Tableau 12 : Exemple de résultats d'évaluation de  $\overline{P}_{L\theta}$ ,  $\overline{L}_\theta^p$  et  $\overline{L}_\theta^f$  sur deux sections reconstruites appartenant au feutre A1.

Les résultats de l'analyse stéréométrique présentés ci-après concernent les feutres A1 et B1. Ces feutres ont été choisis pour leurs caractéristiques de constructions différentes. En effet, le feutre A1 possède un canevas simple alors que B1 possède un double canevas. Des exemples d'enveloppes tridimensionnelles de sécantes sont présentés afin d'illustrer les variations des sécantes dans la structure en fonction de la compression (fig. IV-26 à 29). Ces enveloppes sont la superposition des diagrammes illustrant l'orientation des longueurs moyennes de toutes les sections reconstruites. Elles permettent d'observer l'évolution de l'anisotropie et des valeurs des sécantes pendant la compression du feutre. Cependant, l'échantillon de feutre ayant changé de position angulaire après chaque compression, aucune conclusion ne sera tirée sur l'orientation de ces enveloppes. Leur analyse montre que  $\overline{L}_0^p$  diminue fortement avec la compression dans toutes les sections (fig. IV-26 et 28) alors que  $\overline{L}_0^f$  reste sensiblement constante dans toutes les sections (fig. IV-27 et 29). Alors que la porosité est plus faible dans le canevas que dans les voiles (fig. IV-24), on peut d'observer ici que les sécantes dans les pores sont maximales dans le canevas quelle que soit la direction d'étude (fig. IV-27 et 29).

La représentation des volumes tridimensionnels étant délicate, nous préférons utiliser la moyenne angulaire des sécantes pour décrire l'évolution de la structure des feutres et préciser les remarques précédentes faites sur les longueurs caractéristiques des fibres et des pores.

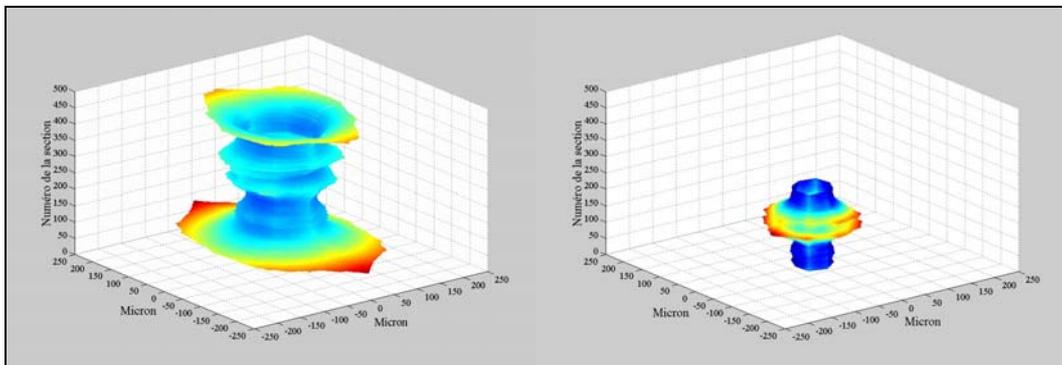


Figure IV-26 : Enveloppe tridimensionnelle des sécantes dans les pores du feutre A1 pour le feutre non déformé (à gauche) et pour le feutre déformé (à droite). Les axes horizontaux renseignent sur la valeur de  $\overline{L}_0^p$ . L'axe vertical montre la position de la section dans le volume. Coloration en fonction de  $\overline{L}_0^p$ . Bleu pour les plus faibles valeurs, en rouge pour les plus fortes.

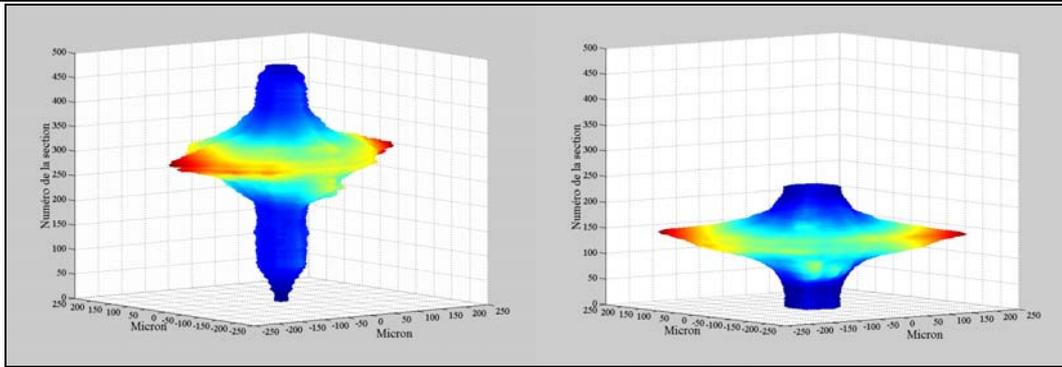


Figure IV-27 : Enveloppe tridimensionnelle des sécantes dans les fils et les fibres du feutre A1 pour le feutre non déformé (à gauche) et pour le feutre déformé (à droite). Les axes horizontaux renseignent sur la valeur de  $\overline{L}_\theta^f$ . L'axe vertical montre la position de la section dans le volume. Coloration en fonction de  $\overline{L}_\theta^f$ . Bleu pour les plus faibles valeurs, en rouge pour les plus fortes.

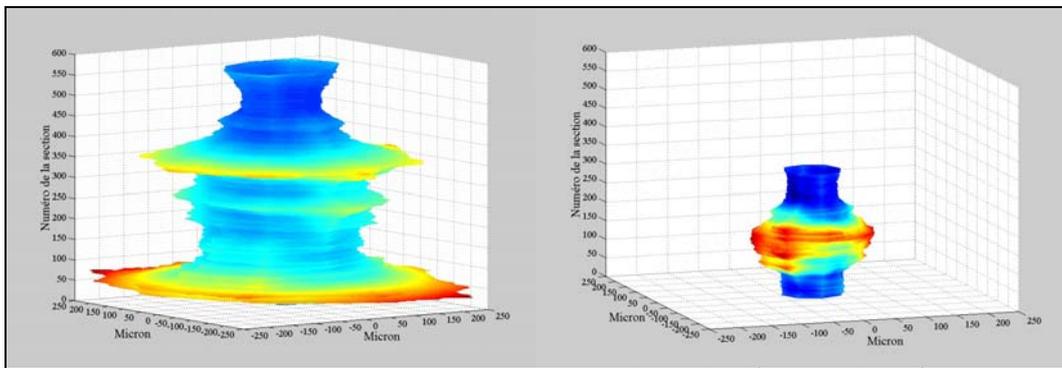


Figure IV-28 : Enveloppe tridimensionnelle des sécantes dans les pores du feutre B1 pour le feutre non déformé (à gauche) et pour le feutre déformé (à droite). Les axes horizontaux renseignent sur la valeur de  $\overline{L}_\theta^p$ . L'axe vertical montre la position de la section dans le volume. Coloration en fonction de  $\overline{L}_\theta^p$ . Bleu pour les plus faibles valeurs, en rouge pour les plus fortes.

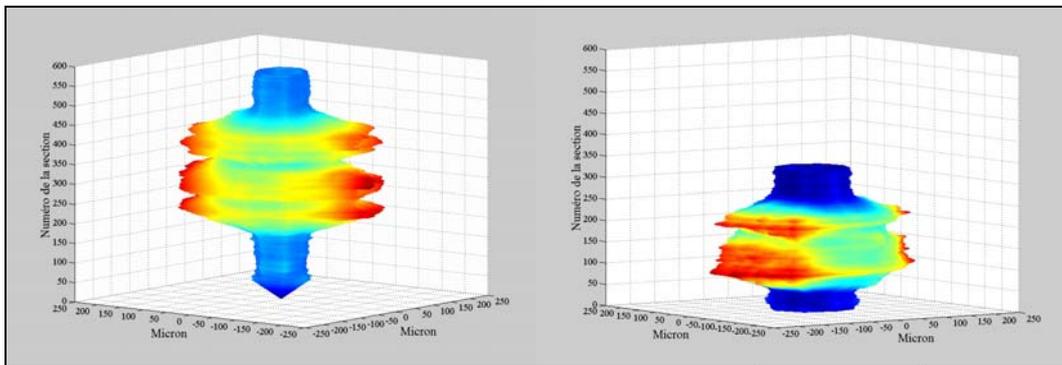


Figure IV-29 : Enveloppe tridimensionnelle des sécantes dans les fils et les fibres du feutre B1 pour le feutre non déformé (à gauche) et pour le feutre déformé (à droite). Les axes horizontaux renseignent sur la valeur de  $\overline{L}_\theta^f$ . L'axe vertical montre la position de la section dans le volume. Coloration en fonction de  $\overline{L}_\theta^f$ . Bleu pour les plus faibles valeurs, en rouge pour les plus fortes.

Les évolutions de la longueur moyenne des cordes dans les pores (dans chaque section) (fig. IV-30), et de la porosité (fig. IV-24), en fonction de la position dans l'épaisseur ne présentent pas de transition très marquée en passant des voiles dans le canevas.  $\langle \overline{L_\theta^p} \rangle$  est de l'ordre de 40 à 100  $\mu\text{m}$  pour tous les niveaux de déformation. Cependant,  $\langle \overline{L_\theta^p} \rangle$  est maximale dans le canevas pour tous les niveaux de déformation.

Au début de la compression les déformations sont localisées aux faces du feutre (fig. IV-30 a et b). En effet,  $\langle \overline{L_\theta^p} \rangle$  n'est pratiquement pas modifiée à l'intérieur du feutre alors qu'elle diminue rapidement au niveau de ses faces. Les valeurs beaucoup plus grandes de  $\langle \overline{L_\theta^p} \rangle$  aux faces du feutre sont cohérentes avec la figure IV-23 concernant l'évolution de la porosité (en particulier l'image illustrant la section 62).

L'analyse de la courbe de  $\langle \overline{L_\theta^f} \rangle$  en fonction de la position de la section d'étude dans l'épaisseur met clairement en évidence la transition entre le voile et le canevas du feutre A1 (fig. IV-31). En effet,  $\langle \overline{L_\theta^f} \rangle$  est quasiment constante autour de 40  $\mu\text{m}$  dans les voiles. Puis, la longueur moyenne de la sécante dans les fils et les fibres augmente brusquement lorsque la section passe dans le canevas jusqu'à une valeur maximale de 170  $\mu\text{m}$ . Ces variations sont dues à la présence des fils du canevas dont les dimensions caractéristiques sont beaucoup plus importantes que celle des fibres du voile. Cette transition brutale est observée à tous les niveaux de déformation (fig. IV-31). Elle peut être utilisée pour évaluer les déformations du canevas et des voiles séparément. Ainsi pour le premier niveau de déformation le canevas est insensible à la compression, son épaisseur de 1,4 mm reste inchangée par rapport à l'état non déformé (fig. IV-31). Pour le dernier niveau de déformation, l'épaisseur du canevas est de 1,25 mm montrant sa déformation. Par conséquent, l'évolution avec la compression des variations de  $\langle \overline{L_\theta^f} \rangle$  dans l'épaisseur appuie la description du mécanisme de déformation faite précédemment : la déformation de la structure commence par la consolidation des faces du feutre avant que le canevas ne commence à se comprimer.

Pour le dernier niveau de déformation, la valeur de  $\langle \overline{L_\theta^f} \rangle$  pour une section appartenant aux voiles augmente. Avec la compression, le réseau fibreux se densifie. Cette densification s'accompagne d'une disparition de l'interface pores fibres augmentant ainsi la longueur moyenne des sécantes dans les fibres.

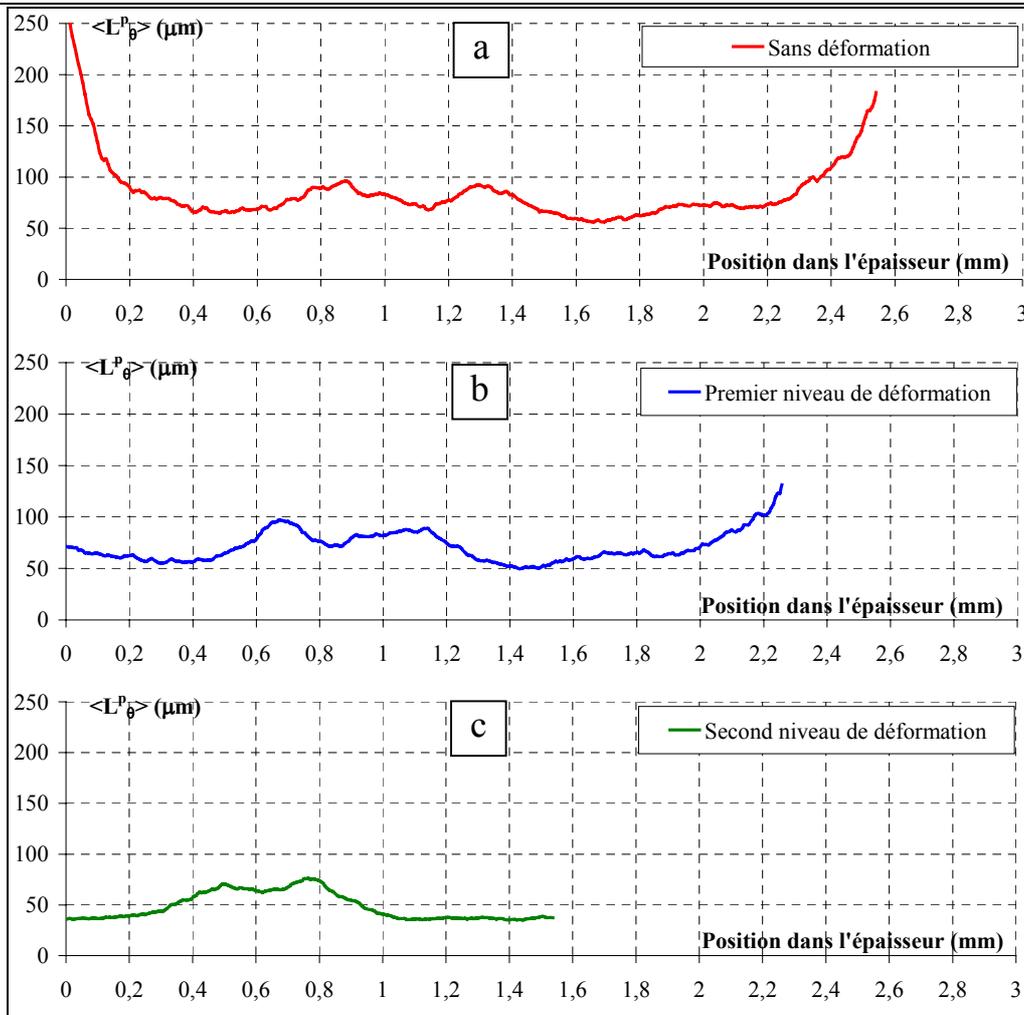


Figure IV-30 : Évolution de la longueur moyenne des sécantes dans les pores pour différents niveaux de déformation du feutre A1

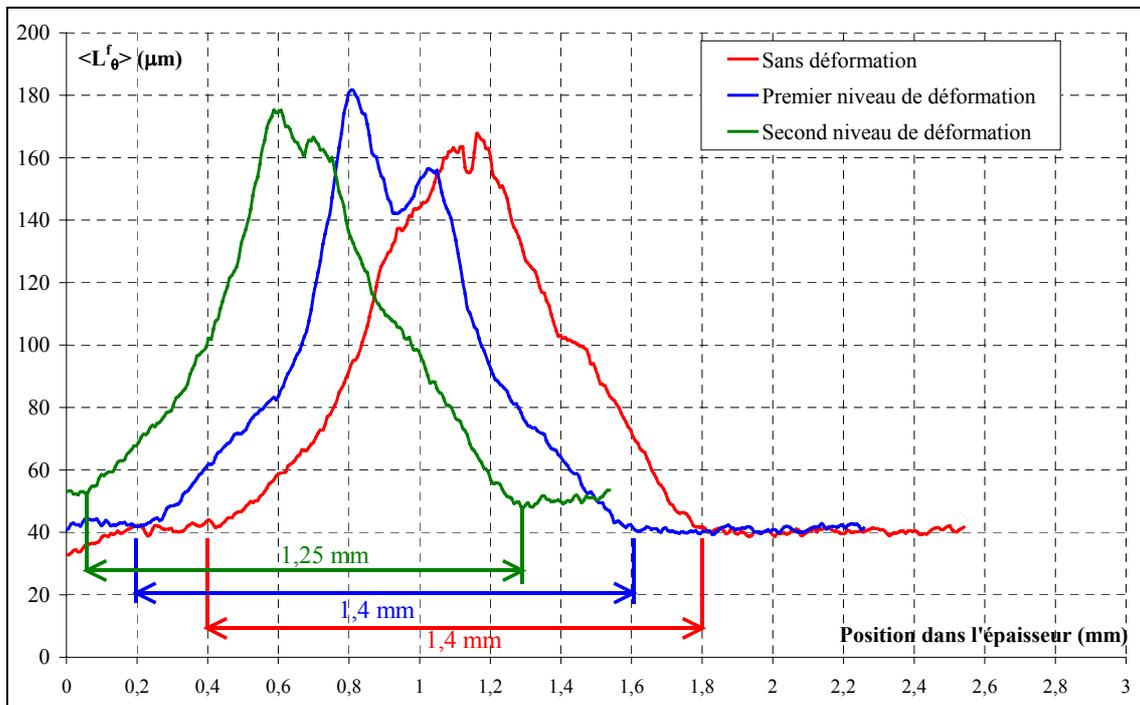


Figure IV-31 : Évolution de la longueur moyenne des sécantes dans les fibres pour différents niveaux de déformation du feutre A1

Les observations faites pour le feutre A1 concernant l'évolution des longueurs moyennes des cordes dans les pores et dans les fils et les fibres sont valables dans le cas du feutre B1 (fig. IV-32).

L'existence des deux canevas est bien mise en valeur dans la figure IV-33 par des valeurs de  $\langle L_{\theta}^f \rangle$  trois fois plus élevées que dans les autres sections du feutre. L'épaisseur du canevas est de 2,24 mm lorsque le feutre n'est pas déformé et elle est de 1,56 mm pour l'état le plus comprimé. Les valeurs de  $\langle L_{\theta}^p \rangle$  sont environ deux fois plus grandes que dans le cas du feutre A1, excepté pour le niveau de compression maximale où elles sont du même ordre de grandeur.

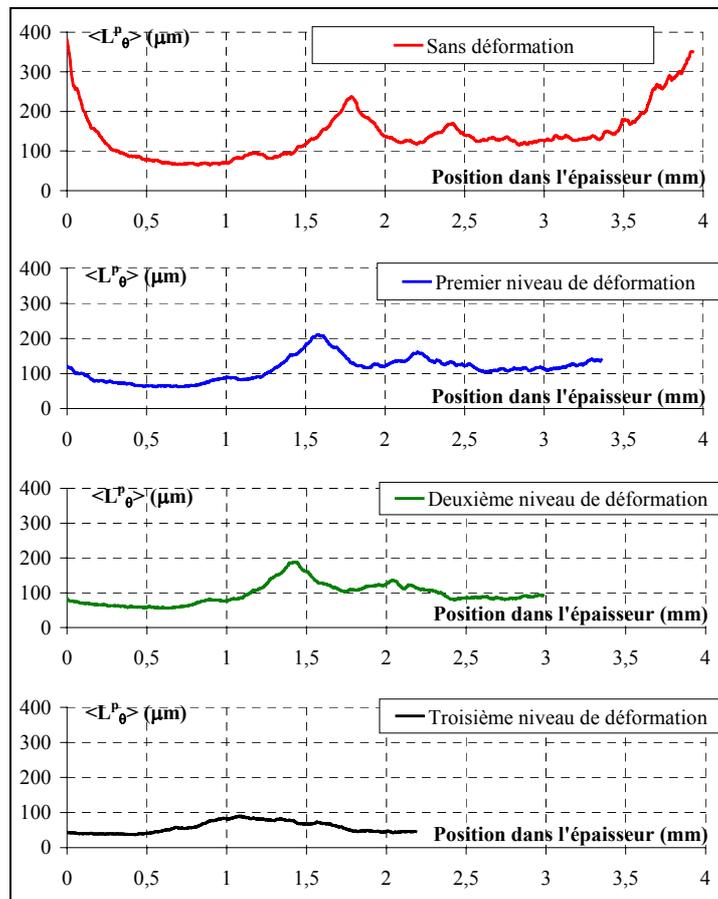
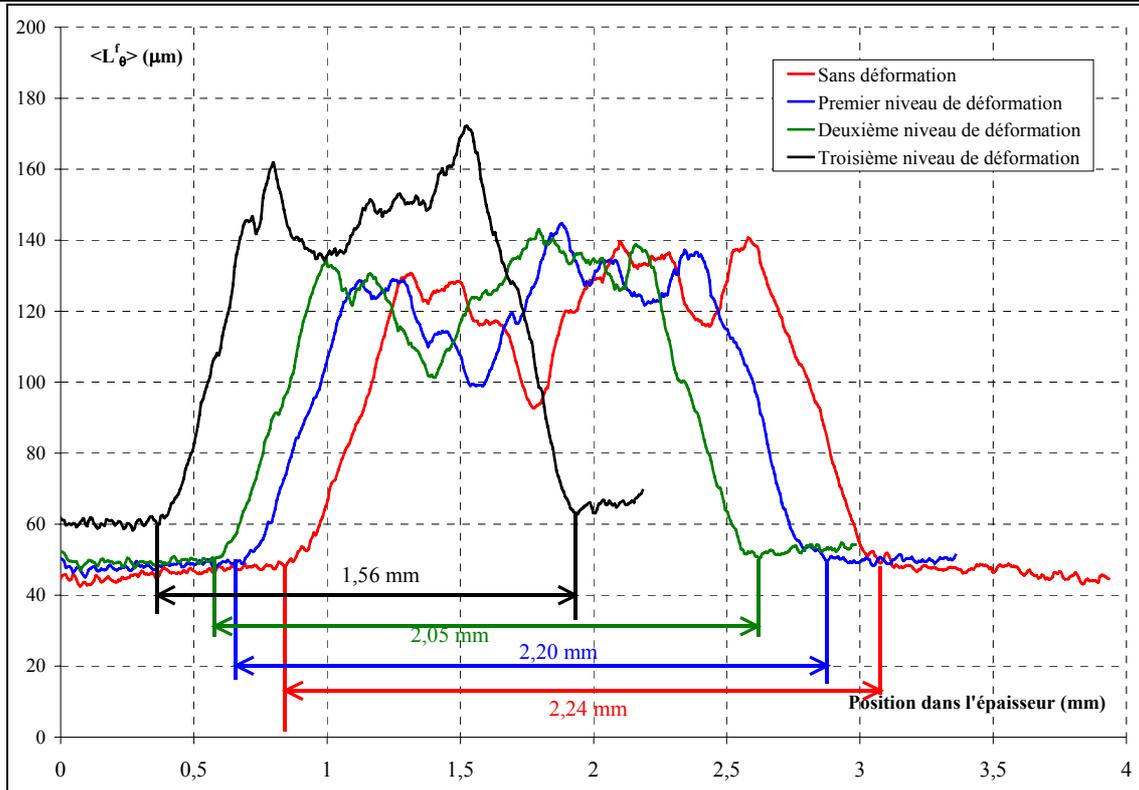


Figure IV-32 : Évolution de la longueur moyenne des sécantes dans les pores pour différents niveaux de déformation du feutre B1



**Figure IV-33 : Évolution de la longueur moyenne des sécantes dans les fils et les fibres pour différents niveaux de déformation du feutre B1**

Les résultats relatifs à la surface spécifique, figure IV-34 pour le feutre A1, et figure IV-35 pour le feutre B1 montrent que la surface spécifique dans le canevas est beaucoup plus faible que dans les voiles. Les dimensions caractéristiques des fibres utilisées pour les voiles sont beaucoup plus petites que celles des feutres. Par conséquent, les fibres présentent plus de surface par unité de volume que les fils du canevas. Pour les deux feutres, le minimum de la surface spécifique dans le canevas est du même ordre de grandeur. Cependant le voile du feutre A1 possède une surface spécifique plus importante que celle du feutre B1. Cela s'explique par des fibres plus fines ou un voile moins dense utilisé lors de la confection des feutres (diamètre moyen des fibres des voiles de  $30 \mu\text{m}$  pour le feutre A1 et de  $36 \mu\text{m}$  pour le feutre B1).

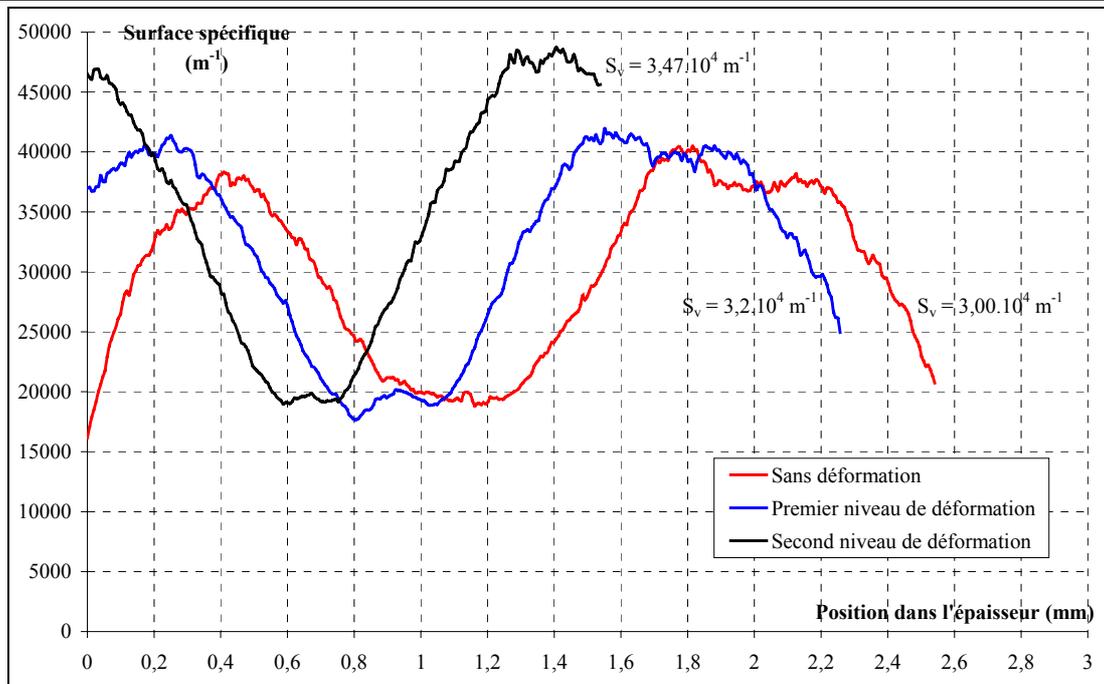


Figure IV-34 : Évolution de la surface spécifique calculée à partir des reconstructions du feutre A1 issues de la microtomographie.

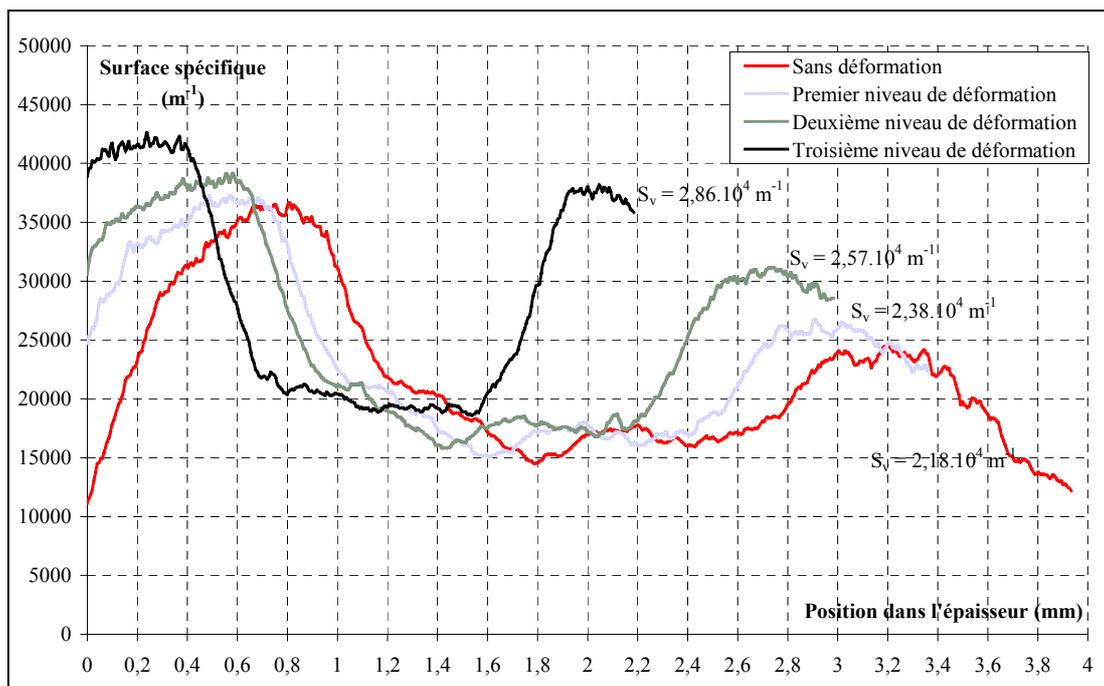


Figure IV-35 : Évolution de la surface spécifique calculée à partir des reconstructions du feutre B1 issues de la microtomographie.

Dans le tableau 13, les valeurs des surfaces spécifiques évaluées d'après les volumes reconstruits du feutre A1 et les valeurs mesurées par le porosimètre au mercure sont regroupées. La dernière colonne de ce tableau correspond à la surface spécifique mesurée dans les pores plus grands que la taille d'un pixel.

Feutre	Porosité	Surface spécifique calculée avec les données issues de la microtomographie.	Surface spécifique totale mesurée interpolée des mesures au porosimètre.	Surface spécifique ( $\Phi > 9 \mu\text{m}$ ) mesurée interpolée des mesures au porosimètre.
A1	0,54	$3,0 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^4$	$4,35 \cdot 10^4$
	0,51	$3,2 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^4$	$4,46 \cdot 10^4$
	0,37	$3,5 \cdot 10^4$	$6,4 \cdot 10^4$	$4,97 \cdot 10^4$

**Tableau 13 : Comparaison des valeurs de surface spécifique évaluées au moyen des volumes reconstruits du feutre A1 et mesurées par porosimétrie au mercure.**

L'écart important entre les valeurs de surface spécifique calculées et celles mesurées par la porosimétrie au mercure peut être expliqué par différentes causes. La première, le niveau de résolution de la caméra ( $6,6 \mu\text{m}$ ). La surface spécifique est très sensible aux pores caractérisés par de faibles diamètres hydrauliques comme le montre la relation IV:16.

Après reconstruction du volume, l'échantillon obtenu fait  $3,8 \text{ mm}$ . Lors des évaluations des différentes grandeurs stéréométriques, les calculs sont effectués sur un cylindre d'un diamètre de  $3,8 \text{ mm}$ . Il est alors possible que l'échantillon utilisé pour évaluer la surface spécifique ne soit pas représentatif du matériau à l'échelle macroscopique. Cette incertitude peut être levée en effectuant des mesures sur d'autres échantillons de feutre identique. À titre de comparaison, pour les essais au porosimètre, deux échantillons d'un diamètre  $8 \text{ mm}$  ont été utilisés. Avec les données actuelles, seule une analyse qualitative peut être entreprise.

L'étude stéréométrique a fait apparaître une structure « moyenne » en goulot de bouteille (fig. IV-26 et 28), zone d'étranglement du réseau poreux. Généralement, ce type structure peut être à la source d'erreur en porosimétrie induisant une sous-estimation du diamètre hydraulique et une surestimation de la surface spécifique. Cependant, les résultats expérimentaux en porosimétrie sont bien validés par les dimensions des fibres et des fils. Par conséquent, le problème d'étranglement ne concerne pas les échantillons de feutres testés.

#### **IV.4 Conclusion.**

Afin de caractériser la structure du feutre, la conductibilité thermique et la porosimétrie ont été utilisées. Les mesures de conductibilité thermique n'ont pas permis de différencier les différentes conceptions de feutre. Les résultats de porosimétrie ont mis en évidence, dans le cas du feutre A1, que la surface spécifique volumique pouvait être calculée connaissant la surface spécifique des constituants et la porosité du feutre. Ceci montre que lors de la déformation de ce feutre, les contacts inter-fibres ne jouent pas un rôle prépondérant dans l'évolution de la surface spécifique volumique du feutre. La même observation a été faite sur les feutres simples canevas A2, A3 et A4. Cependant, ce comportement n'est pas retrouvé dans les résultats concernant le feutre double canevas B1.

La microtomographie aux rayons X constitue une approche originale de la caractérisation de la structure des feutres de presse de papeterie. Cette technique permet d'atteindre une description fine de l'ensemble de la structure du feutre. L'échelle des structures reconstruites a été validée par comparaison directe avec les dimensions des fils. L'évaluation de la surface spécifique est en accord satisfaisant avec les mesures réalisées au porosimètre à mercure. L'écart entre les deux méthodes est compris entre 25% et 38%. Ce qui est acceptable compte tenu des faibles dimensions des volumes utilisés pour le calcul de cette grandeur.

## IV.5 Perspectives : Modélisation de la perméabilité et de la conductibilité thermique.

Connaissant toute la structure du feutre, il est possible de modéliser les phénomènes microscopiques afin de prédire le comportement de l'ensemble à l'échelle macroscopique. Cette approche n'est quantitativement acceptable que si le volume reconstruit est représentatif de l'ensemble du feutre. Avant de modéliser la résistance à l'écoulement à travers le feutre, la représentativité du volume reconstruit doit être établie.

### 5.1.a Utilisation de l'auto-corrélation pour déterminer la représentativité du milieu.

Le feutre est un matériau manufacturé. Par conséquent, sa structure présente des variations. Le canevas du feutre est défini par l'armature, l'espacement entre les fils et leurs caractéristiques. Lors du tissage du canevas, des variations géométriques dans la reproduction du schéma de l'armature peuvent apparaître. Par exemple, elles peuvent provenir des dispersions dans le diamètre des fils ou bien être créées par le métier à tisser lui-même (dispersion dans la direction des fils). Des variations de densité dans les voiles peuvent exister en raison du processus de cardage. Ces dispersions, lorsqu'elles existent, sont en général périodiques. Cette période ( $\sim 1$  m) est liée au tambour des cardeuses (fig. I-20). Le processus d'aiguilletage peut ajouter des variations de densité.

Ainsi de part sa fabrication, le feutre présente des variations structurales dont les dimensions caractéristiques dépendent de la chaîne de production.

Afin de simplifier notre étude, nous considérerons une production idéale, i.e. un tissage sans dispersion géométrique parfaitement périodique, des voiles et un aiguilletage uniformes. Pour un tel feutre, d'après l'analyse de sa fabrication, la taille du volume représentatif dépend de la période du tissage ( $\sim 1$  cm).

Il existe une méthode de détermination des dimensions caractéristiques de matériaux poreux reposant sur l'auto-corrélation (Adler P. M., Jacquin C. G. & al. 1990 ; Bekri S., Xu K. & al. 2000). Cette méthode est décrite ci-après.

Soit  $Z(\mathbf{x})$  la fonction telle que :

$$\begin{cases} Z(\mathbf{x}) = 1 & \text{si } \mathbf{x} \text{ est dans les fibres.} \\ Z(\mathbf{x}) = 0 & \text{si } \mathbf{x} \text{ est dans les pores.} \end{cases} \quad \text{Équation IV:34}$$

La porosité est alors la moyenne spatiale sur tout l'échantillon de cette fonction. La moyenne spatiale de la grandeur  $Y$  est notée  $\langle Y \rangle$ .

$$\varepsilon = \langle Z(\mathbf{x}) \rangle \quad \text{Équation IV:35}$$

La fonction d'auto-corrélation est alors définie ainsi :

$$R(\mathbf{u}) = \frac{\langle (Z(\mathbf{x}) - \varepsilon)(Z(\mathbf{x} + \mathbf{u}) - \varepsilon) \rangle}{\varepsilon(1 - \varepsilon)} \quad \text{Équation IV:36}$$

La fonction R compare la structure à elle-même en la translatant du vecteur  $\mathbf{u}$ . Pour  $\mathbf{u}$  nulle, R vaut 1. Dans le cas de matériau aléatoire non périodique, cette fonction décroît exponentiellement lorsque u augmente. La diminution de R avec u signifie que deux points de la structure distants de u sont de moins en moins dépendants lorsque cette distance augmente. Afin de caractériser cette décroissance, la longueur de corrélation  $\xi$  est utilisée. Elle est définie par :

$$\xi = \int_0^{+\infty} R(\mathbf{u}) d\|\mathbf{u}\| \quad \text{Équation IV:37}$$

Plus  $\xi$  est grand et plus la fonction décroît lentement.

Tous les calculs présentés ci-après ont été réalisés à l'Institut de la Physique du Globe de Paris (IPGP) avec le code de caractérisation de milieux poreux présenté dans (Adler P. M., Jacquin C. G. & al. 1990).

La fonction d'auto-corrélation est calculée dans les directions du système de coordonnées (x, y et z). Étant limité en espace mémoire, cette grandeur est évaluée pour des sous-volumes afin de déterminer le volume minimal à utiliser pour nos simulations numériques. Les sous-volumes utilisés sont extraits du volume binarisé de feutre B1 au niveau de déformation le plus important.

Du fait de la présence du canevas dans la structure du feutre, nous avons choisi de prendre toute l'épaisseur du feutre dans le sous-volume. Les dimensions des sous-volumes utilisés sont présentées dans le tableau 14 ci-après :

Sous-volume	Largeur (X)		Longueur (Y)		Hauteur (Z)	
	en pixels	en mm	en pixels	en mm	en pixels	en mm
Volume 1	150	0,99	150	0,99	332	2,191
Volume 2	240	1,584	100	0,66	332	2,191

**Tableau 14 : Dimension des sous-volumes utilisés pour déterminer les fonctions d'auto-corrélation et les longueurs de corrélations. 1 pixel équivaut à 6,6  $\mu\text{m}$ .**

Par la suite  $R_x$  (respectivement  $R_y$  et  $R_z$ ) désigne la fonction de corrélation avec  $\mathbf{u}$  dirigé dans la direction x (respectivement dans les directions y et z).

L'évaluation de  $R_x$ ,  $R_y$  et  $R_z$  pour les volumes 1 et 2 montre que les fonctions d'auto-corrélation diminuent très vite, s'annulent, puis restent très petites (fig. IV-36). Ainsi la valeur de  $u$  pour laquelle la fonction d'auto-corrélation s'annule est une propriété de la fonction remarquable.

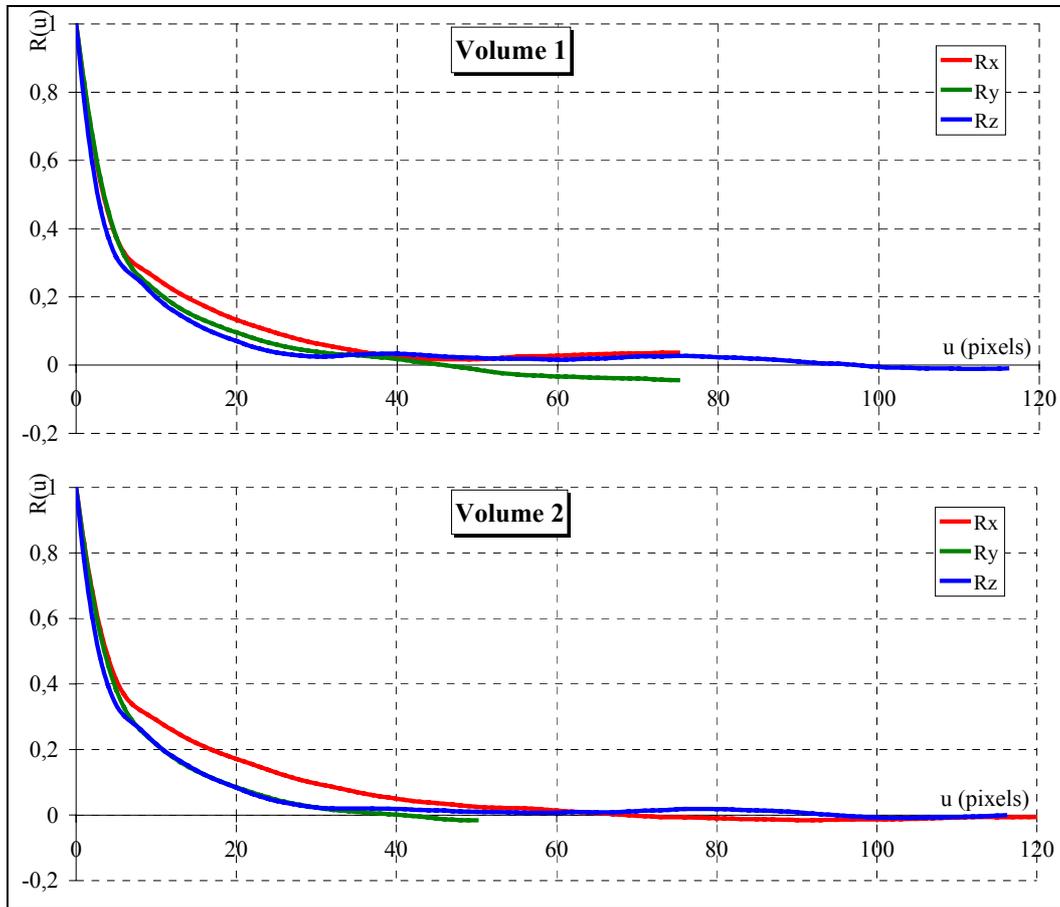


Figure IV-36 : Fonction d'auto corrélation évaluée dans les directions x, y et z pour les volumes 1 et 2. 1 pixel équivaut à 6,6  $\mu\text{m}$

La longueur de corrélation est similaire dans les directions y et z (tableau 15). Elle est plus longue dans la direction x.

Direction de l'évaluation de la fonction d'auto-corrélation	Longueur de corrélation $\xi$ (pixels) Volume 1	u pour $R(u)=0$ (pixels) Volume 1	Longueur de corrélation $\xi$ (pixels) Volume 2	u pour $R(u)=0$ (pixels) Volume 2
x	>8,845	-	9,87	70
y	7,017	40	6,63	45
z	7,209	96	7,026	97

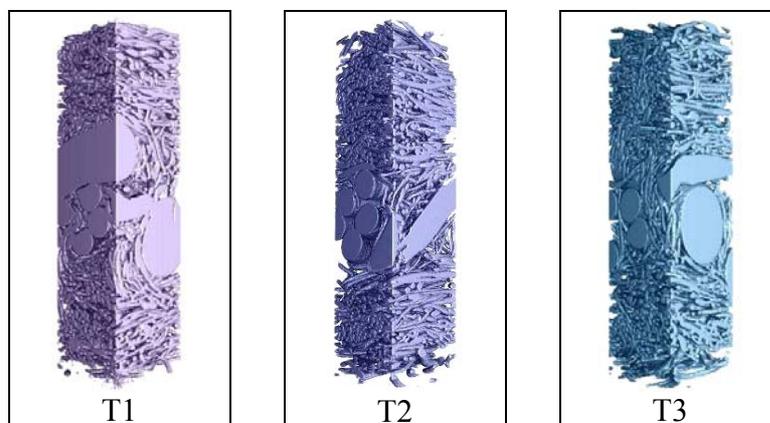
Tableau 15 : Résultats concernant les longueurs de corrélation dans les sous-volumes reconstruits du feutre B1 au niveau de déformation le plus important. Le symbole > indique que la fonction d'auto-corrélation ne s'est pas annulée.

Si les constituants du feutre étaient uniformément répartis dans le volume, un sous-volume de dimension 140 par 90 par 194 pixels serait représentatif du feutre d'après le tableau 15. Dans un tel volume, les trois fonctions d'auto-corrélation s'annuleraient. Cependant, le feutre est constitué par des matériaux de dimensions très différentes qui ne sont pas répartis uniformément dans la structure. L'analyse des fonctions d'auto-corrélation sans connaître a priori la structure ne permet pas de sélectionner un volume représentatif. Il est nécessaire que dans le volume analysé, toutes les particularités de la structure soient présentes.

Dans le cas du feutre B1 non déformé, la fonction d'auto-corrélation s'annule dans toutes les directions si les dimensions du sous-volume sont au moins de 240 pixels par 100 pixels par la hauteur totale du volume principal ( soit 1,6 mm par 0,66 mm par l'épaisseur du feutre). Néanmoins la longueur de corrélation dans la direction y est plus faible pour un tel volume. Ainsi, 240 par 240 pixels par la hauteur totale du volume principal semble alors être le volume minimal afin d'obtenir, après modélisation, des résultats représentatifs sur le feutre B1 pour le niveau de déformation le plus élevé. Cependant, la taille d'un tel sous-volume étant trop importante pour les capacités en mémoires des ordinateurs utilisés. Nous ne l'avons pas testé pour l'instant dans cette étude.

#### 5.1.b Modélisation de la conductibilité thermique des feutres.

Afin de modéliser la conductibilité des feutres, des calculs numériques préliminaires ont été entrepris. Ils concernent la simulation du transfert de chaleur à travers le feutre A3 non déformé. Ces calculs portent sur la conductibilité transversale de 6 sous-volumes binarisés de dimension 97 par 97 par 375 pixels (prenant en compte toute l'épaisseur du feutre) (ou sous-volumes principaux nommés  $T_n$ , avec  $n=1$  à 6) et de 30 sous-volumes binarisés de dimension 97 par 97 par 75 pixels composant les 6 sous-volumes principaux (nommés  $T_{n-m}$  avec  $n=1$  à 6 et  $m=1,5$ ) (fig. IV-38). Les volumes T1, T2 et T3 sont représentés figure (IV-37).



**Figure IV-37 : Illustration des sous-volumes principaux T1, T2 et T3 utilisées dans la simulation du transfert de chaleur dans la direction transversale.**

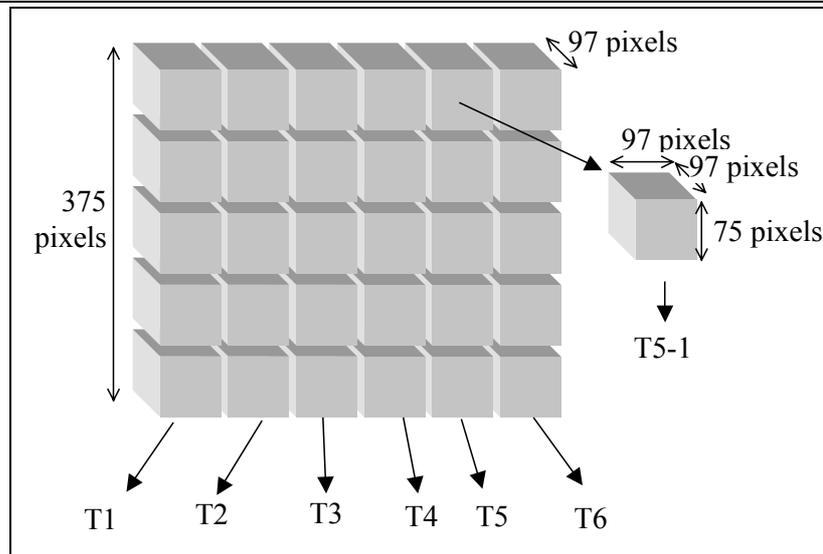


Figure IV-38 : Illustration du choix des sous-volumes. Les petits volumes ont comme dimensions 97 par 97 par 75 pixels. Le plus important a pour dimensions 582 par 97 par 375 pixels.

Les équations de Fourier et la conservation du flux de chaleur sont résolues sur le domaine défini par le volume sélectionné. Le problème équivaut alors à résoudre l'équation de Laplace. Le gradient de température macroscopique imposé par les conditions aux limites est supposé unitaire. La conductivité évaluée par cette méthode est alors adimensionnelle. Les fibres (pixels = 1) sont supposées conductrices et les pores (pixels = 0) non-conducteurs. Afin de modéliser la conductivité adimensionnelle transversale (dans la direction  $z$ ), des plaques isolantes (couches limites) (pixels = 0) sont placées orthogonalement aux directions  $x$  et  $y$  (fig. IV-39). Une condition de périodicité est imposée dans la direction  $z$ . Comme les faces haute et basse du sous-volume ne se raccordent pas, une zone stabilisatrice ou zone tampon (pixel = 1) est placée orthogonalement à  $z$  (fig. IV-39).

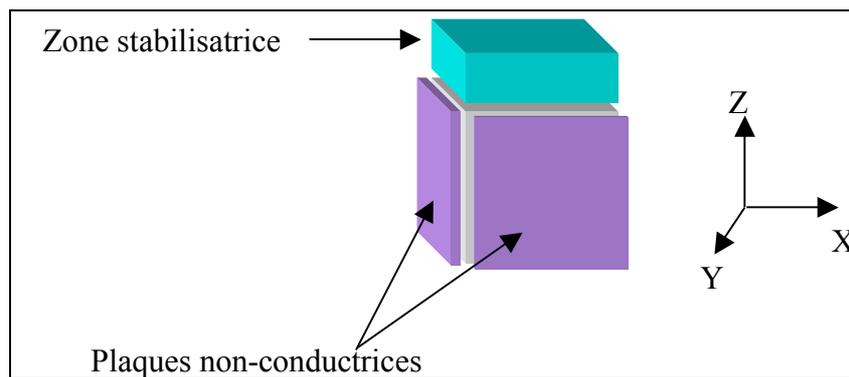


Figure IV-39 : Conditions aux limites employées dans le cadre de la modélisation du transfert thermique dans le volume sélectionné (en gris).

Les résultats des simulations numériques sous-volume par sous-volume sont regroupés dans le tableau 16 ci-après.

Nom du volume	Porosité	Conductibilité adimensionnelle transversale	Nom du volume	Porosité	Conductibilité adimensionnelle transversale
<b>T1</b>	<b>0,58</b>	<b>0,044</b>	<b>T4</b>	<b>0,56</b>	<b>0,015</b>
T1-1	0,69	0,026	T4-1	0,73	0,004
T1-2	0,61	0,071	T4-2	0,35	0,199
T1-3	-	-	T4-3	0,43	0,210
T1-4	0,62	0,057	T4-4	0,59	0,068
T1-5	0,68	0,033	T4-5	0,70	0,027
<b>T2</b>	<b>0,66</b>	<b>0,017</b>	<b>T5</b>	<b>0,60</b>	<b>0,011</b>
T2-1	0,74	0,005	T5-1	0,70	0,056
T2-2	0,58	0,080	T5-2	0,51	0,101
T2-3	0,69	0,050	T5-3	0,43	0,167
T2-4	-	-	T5-4	0,59	0,098
T2-5	0,66	0,028	T5-5	0,75	0,004
<b>T3</b>	<b>0,56</b>	<b>0,021</b>	<b>T6</b>	<b>0,66</b>	<b>0,018</b>
T3-1	0,75	0,007	T6-1	0,71	0,006
T3-2	0,45	0,159	T6-2	0,71	0,005
T3-3	0,41	0,228	T6-3	0,58	0,090
T3-4	0,52	0,071	T6-4	0,62	0,062
T3-5	0,66	0,027	T6-5	0,69	0,029

**Tableau 16 : Résultats de la modélisation, dans le feutre A3 comprimé, du transfert thermique dans la direction transversale. Les conductibilités sont adimensionnelles. Les cases non remplies correspondent à des simulations inachevées.**

La conductibilité adimensionnelle simulée pour le sous-volume principal T1 est deux fois plus grande pour les autres sous-volumes de taille identique. La dispersion des conductibilités est très importante à l'intérieur de chaque sous-volume principal. Elle est très faible pour les volumes situés aux faces du feutres car le feutre est non déformé et la porosité à cet endroit est importante (cf. fig. IV-24). Elle est plus importante pour les sous-volumes centraux, ces volumes contenant plus de matière (fig. IV-38).

Pour vérifier la cohérence des résultats, la conductibilité adimensionnelle des volumes principaux est évaluée à partir de la conductibilité des petits sous-volumes considérant une association en série de ces volumes. Le tableau 17 montre la cohérence des résultats. Cette observation permet dans le cas de volume important excédant la capacité mémoire de les découper en volumes plus petits. Après avoir effectué la simulation sur ces sous-volumes, il est alors possible d'évaluer la conductibilité du volume principal.

Sous-volume principal	Conductibilité évaluée sur le sous-volume principal	Conductibilité évaluée à partir des petits sous-volumes
T3	0,021	0,024
T4	0,015	0,016
T5	0,011	0,017
T6	0,018	0,012

**Tableau 17 : Vérification de la cohérence des résultats en recalculant la conductibilité du sous-volume principal connaissant la conductibilité des petits sous-volume le composant.**

La valeur de la conductibilité adimensionnelle transversale mesurée sur le feutre A3 était de 0,25 (cf. IV.1) soit 10 fois plus grande que celle issue de la simulation. Cet écart ne peut être dû à l'hypothèse faite de négliger la conductivité de l'air (10 fois plus faible que celle du nylon). La principale raison de cette différence est que, lors des mesures, le feutre est légèrement comprimé dans l'appareil afin d'obtenir un contact correct. Dans la simulation, la porosité aux faces est très importante diminuant par conséquent la conductibilité du matériau. Cependant, de nouvelles simulations vont être entreprises en ôtant les zones où la porosité est très faible.

#### 5.1.c Modélisation de la résistance à l'écoulement des feutres.

Les travaux sur l'homogénéisation des écoulements dans les milieux poreux (Bergman D., Lions J.-L. & al. 1985; Skjetne E. et Auriault J.-L. 1999) ont montré que dans certaines conditions, en particulier si la séparation des échelles microscopique et macroscopique est satisfaite, l'homogénéisation des équations de Stokes mène à la relation de Darcy. Ce paragraphe présente les calculs préliminaires aux simulations d'écoulement dans les volumes reconstruits de feutre afin d'évaluer le tenseur perméabilité.

La simulation d'un écoulement dans une structure nécessite beaucoup plus de mémoire que la modélisation du transfert de chaleur dans la même structure. La taille maximale du volume est limitée à 96 par 96 par 96 pixels pour modéliser la perméabilité.

Les équations de Stokes et de conservation sont résolues par un schéma aux différences finies dans le domaine créé par les pores .

Afin que le volume contienne une partie de voile de part et d'autre du canevas, le feutre choisi pour la modélisation est le feutre B1 dans le niveau de compression maximale. Les conditions aux limites sont similaires à celles utilisées pour la conductibilité transversale.

Feutre	Porosité du volume	Porosité du volume totale	Perméabilité dans la direction X ( $\mu\text{m}^2$ )	Perméabilité dans la direction Y ( $\mu\text{m}^2$ )	Perméabilité dans la direction Z ( $\mu\text{m}^2$ )	
			Numérique	Numérique	Num.	Mes.
B1	0,31	0,35	7,84	14,4	3,35	1,5

**Tableau 18 : Résultat de modélisation d'écoulement dans un cube reconstruit de feutre de largeur 96 pixels. Comparaison du résultat dans la direction z avec la perméabilité transversale mesurée avec le perméamètre conçu dans le cadre de cette thèse.**

Les résultats montrent que la perméabilité dans le plan est plus importante que dans le sens transversal comme l'étude expérimentale l'avait montré. Cependant, la perméabilité dans le plan n'est pas isotrope contrairement aux résultats expérimentaux. L'ordre de grandeur des perméabilités longitudinales semble en accord avec les mesures. Toutefois, aucune mesure de perméabilité n'a été faite pour ce niveau de porosité qui nécessite une contrainte mécanique supérieure à 5 MPa. La perméabilité transversale est proche de celle mesurée. Ainsi les calculs préliminaires montrent que la simulation de l'écoulement dans la structure du feutre reconstruite devrait conduire à des résultats intéressants.

## CONCLUSION

L'objectif principal des opérations unitaires successives de la fabrication industrielle du papier est de retirer l'eau de la feuille humide. L'efficacité de la section des presses d'une machine à papier influence toute l'économie d'une papeterie. Suivant les caractéristiques de la production, il est possible de trouver des feutres apportant l'efficacité optimum de la section des presses. Pour cela, l'influence de la structure des feutres sur l'essorage doit être maîtrisée. La recherche d'un optimum nécessite la prise en compte de nombreux paramètres physico-chimiques et mécaniques, parmi lesquels la résistance à l'écoulement.

Dans le cadre du projet européen Joule III (JOECT92), le tenseur perméabilité a été étudié. Les influences de la compression et de la mise en tension sur le tenseur de perméabilités ont été étudiées pour différents feutres. Ces résultats ont été communiqués aux membres du projet Joule III afin d'être intégrés dans une simulation numérique du pressage à impulsion thermique (Gustafsson J.-E. et Kaul V. 2000).

Les résultats expérimentaux ont montré que tendre le feutre neuf dans le sens marche de la machine à papier n'a aucune influence sur son tenseur perméabilité. L'étude de la perméabilité longitudinale des feutres a mis en évidence que l'anisotropie de la structure n'impliquait pas l'anisotropie de la perméabilité dans le plan des feutres. Cependant, pour tous les feutres, la perméabilité transversale est inférieure ou égale à la perméabilité longitudinale.

La relation de Kozeny-Carman souvent utilisée pour la modélisation du pressage a été mise en défaut pour certains feutres dont la perméabilité décroît lentement avec la compression.

Généralement, le choix des feutres pour une section de presses se fait à partir de la détermination de la perméabilité transversale des feutres non déformés. Grâce à l'appareil conçu dans cette thèse, il est maintenant possible de tenir compte de l'influence des déformations sur le tenseur de perméabilités du feutre afin d'optimiser les sections de presses. De plus, la connaissance du comportement du tenseur de perméabilités permet d'améliorer les modélisations existantes du pressage.

Afin de caractériser la structure du feutre, la conductibilité thermique et la porosimétrie ont été utilisées. Les mesures de conductibilité thermique n'ont pas permis de différencier les différentes conceptions de feutres. Les résultats de porosimétrie ont mis en évidence que lors de la déformation de feutre avec un simple canevas, les contacts inter-fibres ne jouent pas un rôle prépondérant dans l'évolution de la surface spécifique volumique du feutre. Ainsi, la surface spécifique de ces feutres peut être évaluée d'après le diamètre moyen des fibres les constituant.

La microtomographie aux rayons X permet d'atteindre une description fine de l'ensemble de la structure du feutre. Cependant, le volume d'échantillon reconstruit n'étant pas toujours représentatif de l'ensemble du feutre, seules des analyses qualitatives pourront être menées. La connaissance de la structure tridimensionnelle peut servir de support à la reconstruction numérique de matériaux complexes comme les feutres. Connaissant la description de la structure, il est alors possible d'évaluer les propriétés physiques telles que la résistance à l'écoulement ou la conductibilité thermique des feutres, en modélisant les phénomènes existants à l'échelle microscopique.

## RÉFÉRENCES

- Adler P. M., Jacquin C. G., et al.** (1990). “*Flow in simulated porous media.*” International journal of multiphase flow, vol. n°16(n°4): pp 691-712.
- Adler P. M. et Thovert J.-F.** (1998). “*Real porous media : local geometry and macroscopic properties.*” American society of mechanical engineers, vol. n°51(n°9): pp 537-585.
- Ahn S. H., Lee W. I., et al.** (1995). “*Measurement of the three-dimensional permeability of fiber preforms using embedded fiber optic sensors.*” Journal of composite material, Vol. n°29(n°6): pp 714-733.
- Aitken Y., Cadel F., et al.** (1988). “*Constituant fibreux des pâtes, papiers et cartons : pratique de l'analyse d'images.*”, Grenoble, livre édité par Centre Technique du Papier.
- Andreoulis N.** (1982). “*Développement des feutres humides modernes en fonction de l'évolution des vitesses et des nouveaux types de presses.*” Revue ATIP, vol. 36(n°9): pp 491-497.
- Antoine C., Nygard P., et al.** (2001). “*Binarisation of 3D images of paper obtained by phase-contrast X-ray microtomography.*”, Final Workshop of the COST action E11 : Characterization methods for fibers and paper proceedings, Hanasaari, Espoo, Finland
- Asklöf C. A., Larsson K. O., et al.** (1964). “*Flow conditions in a felt in a plain press nip.*” Pulp and paper magazine of Canada, (n°6): pp T246-T250.
- Auriault J.-L.** (1987). “*Nonsaturated deformable porous media: Quasistatics.*” Transport in porous media, (n° 2): pp 45-64.
- Auriault J.-L. et Caillerie D.** (1989). “*Quelques remarques sur les méthodes d'homogénéisation.*” Revue française de géotechnique, vol. 49: 22 pages.
- Back E. L. et Swenson R.** (1981). “*The present state of press-drying of paper.*”, 70ième Fundamentals Research Symposium proceedings, pp 2-32.
- Baker G. L. et Eric C. E.** (1999). “*The art and science of press felt cleaning and conditioning.*” Tappi journal, 82(n°7): pp 48-58.
- Ballard J.** (1986). “*Press felt characterization.*”, Tappi engineering conference proceedings, Atlanta, pp 117-122.
- Banks R.** (1994). “*Multiple base press fabrics balance sheet quality with optimum drainage.*” Pulp and paper: pp 127-128.
- Barlow S. K., Crouse J. W., et al.** (1997). “*Fabric developent for impulse drying.*” Tappi journal, Vol. 80(n°7): pp 109-114.
- Baruchel J., Buffière J.-Y., et al.** (1998). “*X-ray tomography in material science.*”, livre édité par Hermes.
- Bates P. J., Taylor D., et al.** (2000). “*Compaction and transverse permeability of glass rovings.*” Applied composite materials, (n°8): pp163-178.
- Beck D. A.** (1980). “*The dynamic properties of the paper-machine wet felt in a press nip.*”, Tappi engineering conference proceedings, Washington, pp 181-187.
- Beck D. A.** (1983). “*Fluid pressures in a press nip : Measurement and conclusions.*”, Tappi engineering conference proceedings, Dallas, pp 475-479.
- Bekri S., Xu K., et al.** (2000). “*Pore geometry and transport properties in North Sea chalk.*” Journal of Petroleum Science and Engineering, (n°25): pp 107-134.
- Bennett M. B.** (1998). “*The press section from the machine clothing prespective - removing more water at faster speed.*” Tappi journal, Vol. 81(n°6): pp 65-68.

- Bergman D., Lions J.-L., et al.** (1985). "*Les méthodes d'homogénéisation : théorie et applications en physique.*", livre édité par Eyrolles.
- Biot M. A.** (1962). "*Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media.*" Journal of applied physics., Vol. n°33(n°4): pp 1482-1498.
- Bloch J.-F.** (1995). "*Transferts de masse et de chaleur dans les milieux poreux déformables non saturés : application au pressage du papier.*", Thèse en Génie des procédés papetiers. Grenoble, INPG.
- Burns J. R., Lindsay J. D., et al.** (1992). "*Dynamic measurements of stratified consolidation in a press nip.*" Tappi engineering conference proceedings, pp 899-917.
- Busker L. H.** (1971). "*Effects of extended nips on wet pressing.*" Tappi journal, Vol. 54(n°3).
- Carlsson C., Lindström T., et al.** (1982). "*Some basic aspects on wet pressing of paper.*", Water removal symposium proceedings, Stockholm, pp 5-12.
- Carman P. C.** (1937). "*Fluid flow through granular beds.*" Trans. Institute chemical engineering: pp 150 - 166.
- Carrayrou J., Mosé R., et al.** (2002). "*A new efficient algorithm for solving thermodynamic chemistry.*" AIChE J., (accepté).
- Cazeaux J. et Despujols J.** (1992). "*Tomographie à rayons X.*" Techniques de l'ingénieur. P-950: 14 pages.
- Cheatham J. F.** (1984). "*Roll cover considerations for high-impulse presses.*" Tappi journal, Vol. 67(n°11): pp 82-86.
- Chevallier P.** (1988). "*Contribution à l'optimisation des feutres de presses humides de papeteries.*", Thèse en Génie des procédés papetiers. Grenoble, Institut national polytechnique de Grenoble.
- Chevallier P.** (1992). "*Felt design factor : a tool for optimizing sheet dryness.*", ATIP 45ième congrès annuel proceedings, Bordeaux, 22 pages.
- Cloetens P.** (1999). "*Contribution to phase contrast imaging, reconstruction and tomography with hard synchrotron radiation.*", Thèse. Grenoble, Université de Bruxelles.
- Comiti J.** (1987). "*Contribution à la modélisation des lits fixes. Application aux lits de particules parallélépipédiques : dégradation d'énergie, dispersion axiale, transfert de matière.*", Thèse en Génie des procédés. Grenoble, INPG.
- Cottigny C. M. et Liu T. J.** (1978). "*Minimizing sheet rewet by inverse batt stratification.*", Tappi engineering conference proceedings, San Francisco, pp 87-91.
- Coulter T. E.** (1994). "*Modern press felt designs and application.*" proceedings, pp 251-257.
- Cutshall K. et Johnson M. C.** (1992). "*Result of a survey of wet press temperature, loading, and dryness.*", Tappi engineering conference proceedings, pp 917-933.
- Darcy H. P. G.** (1856). "*Les fontaines publiques de la ville de Dijon.*", Paris, livre édité par Victor Dalmont.
- Davis E. J., Stratton R. A., et al.** (1983). "*Water removal studies with wet press simulator.*" Journal of pulp and paper science, Vol. n°9(n°3): pp 68-73.
- De Biasi P.-M.** (1999). "*Le papier, une aventure au quotidien.*", livre édité par Découvertes Gallimard.
- DeCrosta E. F. et Plaisted W. E.** (1978). "*From the laboratory to the paper mill : a study of pressing.*", Engineering Conference proceedings, pp 211-217.
- Dutreix J., Desgrez A., et al.** (1993). "*Biophysique des radiations et imagerie médicale.*", Paris, 3ième édition, livre édité par Masson.
- El Hosseiny F.** (1990). "*Compression behaviour of press felts and wet webs.*" Nordic pulp and paper research journal, (n° 1): pp 28-32.

- Fall Y. S.** (1990). "La presse Tem-Sec, Le pressage à chaud, Théorie et réalités - Perspectives de développement." Revue ATIP, vol. 44(n° 4/5): pp 185-192.
- Faure Y.-H.** (1988). "Approche structurale du comportement filtrant des géotextiles.", Thèse en Mécanique. Grenoble, Université Joseph Fourier.
- Fekete E. Z.** (1975). "Water removal performance on a grooved second press, Part II.", International water removal symposium proceedings, London, pp 117-143.
- Fekete E. Z.** (1998). "Water at the nip and wet-pressing efficiency." Tappi journal, vol n°81(n°3): pp 103-105.
- Fekete E. Z. et Wiebe K. M.** (1999). "The limits of pressing." Tappi journal, vol n°82(n°11): pp 81-87.
- Foulger M. F.** (1995). "Pressing of recycling fiber." World paper, (n°4): pp 38-39.
- Fourcade B.** (1998). "Mécanique Analytique.", Dernier accès le: 31/08/2001. <http://magphy.ujf-grenoble.fr/pub/cours/1998/lpr/meca/html/node61.html>
- Gebart R. B. et Lidström P.** (1996). "Measurement of in-plane permeability of anisotropic fiber reinforcements." Polymer composites, Vol. 16(n° 5): pp 429-445.
- Gibson P., Rivin D., et al.** (1999). "Humidity-dependent air permeability of textile materials." Textile Research Journal, 69(n°5): pp 311-317.
- Goel A., Tzanakakis M., et al.** (2001). "Characterization of the three-dimensional structure of paper using X-ray microtomography." Tappi journal Peer reviewed paper, Vol. 84(n°5): 6 pages.
- Gudehus T.** (1988). "Stoffentwässerung im Walzenpresspalt, L'essorage de la feuille de papier dans la zone de contact entre les rouleaux de presse." Das Papier, Vol n°42(n°4, n°5, n°7).
- Gustafsson J.-E. et Kaul V.** (2000). "A general model of wet pressing.", Progress in paper physics : a seminar proceedings, Grenoble, p106.
- Gustafsson J.-E. et Kaul V.** (2001). "A general model of deformation and flow in wet webs under compression." Nordic pulp and paper research journal, 16(2): pp 149-154.
- Hagerty G. A., Walkinshaw J. W., et al.** (1993). "Design of modern air permeability instrument comparable to Gurley-type instruments." Tappi journal, Vol. 76(n°2): pp 97-100.
- Han S. T.** (1969). "Compressibility of fibre mats." Pulp and paper magazine of Canada, vol. 70(n°9): pp 65-77.
- Hawes J.** (1999). "Apertured structures : a new class of porous polymeric press fabric." Pulp and paper magazine of Canada, vol n°100(n°12): pp 103-105.
- Helle T. et Forseth T.** (1994). "Influence of felts structure on water removal in a press nip." Tappi journal, vol. 77(n° 6): pp 171-178.
- Heller H. H. et Tewksbury C. G.** (1972). "What are the limits of paper dryness obtainable in a wet press ?" Tappi journal, vol.(n° 6): pp 893-896.
- Hintermaier J. C.** (1963). "Wedge effect in a plain press nip." Tappi journal, Vol. n°46(n°3): pp 190-195.
- Horn R. A. et Setterholm V. C.** (1983). "Continuous on-line press drying of high-yield oak fiber for linerboard." Tappi journal, Vol. 66(n°6): pp 59-62.
- I'Anson S. et Ashworth T.** (2000). "Differentiated permeability surface layer (DPSL) Pressing theory." Tappi journal Peer reviewed paper, vol.83(n°11): 16 pages.
- Ilvespää H.** (1996). "A new era in pressing." Paper technology, (n° 12): pp 27-36.
- Ingmanson W. L., Andrew B. D., et al.** (1959). "Internal pressure distributions in compressible mats under fluids." Tappi journal, (n° 42): p 840.

- Jönsson K. A.-S. et Jönsson B. T. L.** (1992). "Fluid flow in compressible porous media, I : Steady state conditions, II : Dynamic behaviour." AICHe journal, vol. 38(n° 9).
- Justus E. J.** (1964). "The vented nip press." Tappi journal, Vol. 47(n°8): pp 493-493.
- Kånge L.-H. T.** (1995). "Mesure de la perméabilité à l'eau des feutres de presses." ATIP, vol. 49(n° 2): pp 58-61.
- Kerekes R. J. et MacDonald J. D.** (1991). "A decreasing permeability model of wet pressing : theory." Tappi journal, Vol. 74(n°12): pp 150-156.
- Kerschmann R.** (2001). "Filter Media Structure in Virtual reality." Filtration + Separation, Vol. 38(n°7): pp 26-29.
- Kershaw T. N.** (1972). "The three dimensions of water flow in press felts." Tappi journal, vol. 55(n° 6): pp 880-887.
- Koltodziej J. A., Dzieciolak R., et al.** (1998). "Permeability tensor for heterogeneous porous medium of fibre type." Transport in porous media, vol. 32: pp 1-19.
- Kyan C. P.** (1970). "Flow of single phase through fibrous beds." Industrial engineer chemical fundamental, vol. 9(n° 4): pp 596-602.
- Lange D.** (1996). "Extended nip pressing of paper grades.", 82nd annual meeting, Technical section, CPPA proceedings, pp B97-B100.
- Lawrence C. A. et Shen X.** (2000). "An investigation into the hydraulic properties of needle-punched nonwovens for application in wet press concrete casting. Part II : Predictive models for the water permeability of needle-punched nonwoven fabrics." Journal of textile institute, n°91 part 1(n°1): pp 61-77.
- Lekakou C., Johari M. A. K., et al.** (1996). "Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding." Composites, Part A(27A): pp 401-408.
- Lewalle J., Singh K. M., et al.** (1986). "Analysis of the wet pressing of paper pulp." Mechanics of materials.
- Lindsay J. D.** (1989). "The physics of impulse drying: new insights from numerical modelling.", Fundamental Research Symposium Proceedings proceedings, Cambridge, pp 679-729.
- Lindsay J. D. et Brady P. H.** (1993). "Studies of anisotropic permeability with applications to water removal in fibrous webs. Part 1 : Experimental methods, sheet anisotropy and relationships to freeness." Tappi journal, vol. 76(n° 9): pp 119-127.
- Lopez S.** (1991). "Etude du comportement rhéologique des feutres de machines à papier.", Thèse en Génie des procédés. Grenoble, INPG.
- Luciano W. A.** (1983). "A practical model for felt compressibility." Journal of pulp and paper science, Vol. n°9(n°3): pp TR65-TR68.
- Lundström S. T., Gebart R. B., et al.** (1999). "In-plane permeability measurements on fiber reinforcements by multi-cavity parallel flow technique." Polymer composites, Vol. 20(n° 1): pp 146-154.
- Lundström T. S., Stenberg R., et al.** (2000). "In plane permeability measurements : a nordic round robin study." Composites, Part A(31A): pp 29-43.
- MacDonald J. D., Hamel J., et al.** (2000). "Design equation for paper machine press sections." Journal of pulp and paper science. Vol. 26: pp 401-406.
- MacDonald J. D. et Kerekes R. J.** (1991). "A decreasing permeability model of wet pressing : applications." Tappi journal, Vol. 74(n°12): pp 142-149.
- MacDonald J. D. et Kerekes R. J.** (1995). "A decreasing permeability model of wet pressing with rewetting." Tappi journal, Vol. 78(n°11): pp 107-111.
- MacGregor M. A.** (1985). "What appens during shell and groove marking." Tappi journal, Vol. 68(n°9): pp 84-91.

- MacGregor M. A.** (1989). "*Wet pressing research in 1989, An historical perspective, Analysis and commentary.*".
- MacGregor M. A.** (2001). "*Wet pressing and paper properties, A micromechanical view.*", Tappi practical of pressing and drying, short courses proceedings
- Macklem J. E.** (1961). "*A study of the resistance of woven wool felts to liquid flow.*" Tappi journal, vol. 44(n°8): pp 535-544.
- Mackless E. A.** (1988). "*Impulse drying, a pressing - flashing drying phenomena.*".
- MacNamara S. J.** (1964). "*Water removal capacity of running press felts.*" Pulp and paper magazine of Canada, (n° 12): pp 529-532.
- Mao N. et Russel S. J.** (2000). "*Directional permeability in homogeneous nonwoven structures. Part I :the relationship between directional permeability and fibre orientation.*" Journal of textile institute, Vol. 91 part 2(n° 2): pp 244-258.
- Mao N. et Russel S. J.** (2000). "*Directional permeability in homogeneous nonwoven structures. Part II : permeability in idealised structures.*" Journal of textile institute, Vol. 91 part 1(n° 2): pp 244-258.
- Martinez D. M.** (1999). "*An estimate of the in-plane velocity difference between the fibers and water during wet pressing : the saturated case.*" Journal of pulp and paper science, vol. 25(n° 12): pp 403-409.
- Meadows D. G. et Shearin R. H.** (1995). "*Supplier survey gives insight on advancements and qualities.*" Tappi journal, vol. 78(n° 7): pp 44-48.
- Montgomery S. M., Miller B., et al.** (1992). "*Spatial distribution of local permeabilities in fibrous networks.*" Textile Research Journal, 62(n°3): pp 151-161.
- Mouette J.** (1998). "*Physique des Surfaces et des Interfaces.*", Dernier accès le: 31/08/2001. <http://www.ens-lyon.fr/~jmouette/surfaces/cours.html>
- Mukhopadhyay A. K. et Kingsbury H. B.** (1980). "*A study of two dimensional flow in the press nip.*" Tappi journal, vol. 63(n° 7): pp 87-90.
- Nilsson P. et Larsson K. O.** (1968). "*Paper web performance in a press nip.*" Pulp and paper magazine of Canada, vol. 20(n°12): pp 66-73.
- Nissan A. H.** (1954). "*The functions of the felt in water removal on the papermaking machine.*" Tappi journal, vol. 37(n°12): pp 597-608.
- Oger L., Gauthier C., et al.** (1989). "*Hétérogénéités et longueurs caractéristiques dans les milieux poreux.*" Entropie, (n°152): pp 29-42.
- Orloff D. I., Patterson T. F., et al.** (1998). "*Opening th operationg window of impulse drying, Part I : the effect of ambient pressure at the nip opening.*" Tappi journal, Vol. n°81(n°7): pp 113-116.
- Orloff D. I., Patterson T. F., et al.** (1998). "*Opening the operationg window of impulse drying, Part II : the effect of ambient pressure at the nip opening.*" Tappi journal, Vol. n°81(n°8): pp 195-203.
- Orloff D. I., Phelan P. M., et al.** (2000). "*Impulse drying of board grades: Pilot production trials.*" Tappi journal peer reviewed paper, Vol. n°83(n°9): 12 pages.
- Österberg L. B.** (1978). "*Studies of press felt compression.*" Svensk papperstidning, (n°10): pp 39-39.
- Parnas R. S., Howard G. J., et al.** (1995). "*Permeability characterisation. Part I: A proposed standard reference fabric for permeability.*" Polymer composites, Vol. 16(n° 5): pp 429-445.
- Parnas R. S. et Salem A. J.** (1993). "*A comparison of the unidirectional and radial in-plane flow through woven composite reinforcement.*" Polymer composite, Vol. n°14(n°5): pp 383-394.

- Paulapuro H.** (1990). "*Developments in wet pressing.*", 24th EUCEPA conference proceedings, Stockholm, pp 88-100.
- Paulapuro H. et Nordman L.** (1991). "*Wet pressing : history and future trends.*" Pulp and paper magazine of Canada, vol. 92(n° 1): pp 41-50.
- Pierce F. T.** (1947). "*Geometrical principles applicable to the design of functional fabrics.*" Textile research journal, Vol n°18(n°3): pp 123-147.
- Pikulik I. I.** (1999). "*Effects of shoe pressing on fine paper properties.*" Tappi journal, Vol n°82(n°11): pp 88-92.
- Pikulik I. I., Gilbert D., et al.** (1991). "*A new instrument for measuring the permeability of paper machine clothing.*" Tappi journal, vol.(n° 5): pp 169-176.
- Pikulik I. I. et MacDonald J. D.** (1987). "*Pressing-induced two-sidedness of paper.*" Tappi journal, Vol n°70(n°4): pp 75-78.
- Pikulik I. I., MacDonald J. D., et al.** (1993). "*The release of wet paper from novel press roll materials.*" Pulp and paper magazine of Canada, Vol. 94(n° 4): pp 46-51.
- Plaisted W. E., DeCrosta E. F., et al.** (1980). "*Friction factors for press felts.*" Pulp and paper magazine of Canada, vol. 81(n°2): pp 76-79.
- Publicité** (1997). "*Lorentzen et Wettre : Présence accrue sur la machine à papier.*" La papeterie, vol. 5(n° 209).
- Rahli O., Tadriss L., et al.** (1995). "*Etude expérimentale des écoulements darcéens à travers un lits de fibres empilées aléatoirement : influence de la porosité.*" Journal de Physique II, (n°11): p 1739-1756.
- Rasoloarijoana M. N.** (1993). "*Non linéarités de la loi de Darcy : étude théorique, numérique et expérimentale.*", Thèse en Mécanique. Grenoble, Université Joseph Fourier.
- Rebenfeld L. et Miller B.** (1995). "*Using liquid flow to quantify the pore structure of fibrous materials.*" Journal of the textile institute, (n°2): pp241-251.
- Reese R. A.** (1991). "*Pressing operations.*", Paper machine operation proceedings, pp 260-281.
- Rempel N. C.** (1972). "*Factors influencing vented nip press water removal efficiency.*" Tappi, 55(n°6): pp 897-900.
- Reverdy N., Bloch J.-F., et al.** (2001). "*Caractérisation de papier avec la microtomographie au rayon X.*" ATIP, Vol. 55(n°4): pp 12-18.
- Rigdahl M., Bäckström M., et al.** (2000). "*Impulse technology on the eurofex machine.*" Tappi journal peer reviewed paper, vol. n°83(n°8): pp 222-230.
- Rodden G.** (2000). "*Press felts, The quest for speed drive new developments in clothing.*" Pulp and paper magazine of Canada, vol. n° 101(n°3): pp 19-25.
- Rogut R.** (1995). "*Measuring water flows on pressing between two felts.*" Przegląd papierniczy (the polish paper review), vol n° 96: pp 63-65.
- Roux J. C.** (1989). "*Modélisation et optimisation du fonctionnement des presses de machines à papier.*" APII, Fonctionnement des presses de machine à papier, vol. 23(n° 3): pp 283-302.
- Roux J. C. et Vincent J. P.** (1991). "*A proposed model in the analysis of wet pressing.*" Tappi journal, (n° 2): pp 189-196.
- Royo M. A. et Berggren C. O.** (1979). "*Double felting of second and third presses.*" Tappi journal, Vol. 62(n°3): pp 37-39.
- Rupp J.** (1997). "*Nouvelle génération de fibres pour feutres de papeterie.*" IBT non-tissés, (n°3): pp 50-52.

- Scheidegger A. E.** (1974). "*The physics through porous media.*", Toronto, livre édité par University of Toronto press.
- Schiel C.** (1969). "*Optimizing the nip geometry of transversal flow presses.*" Pulp and paper magazine of Canada, (n°3): pp 73-78.
- Setterhom V. C.** (1979). "*An overview of press drying.*" Tappi journal, Vol. 62(n°3): pp 45-46.
- Skjetne E. et Auriault J.-L.** (1999). "*New insights on steady, non linear flow in porous media.*" Eur. J. Mech B/Fluids, Vol. n°1(n°18): pp 131-145.
- Springer A. M., Waller M. H., et al.** (1989). "*Development of a dynamic press simulator.*" Tappi journal: pp 149-153.
- Strehlé P. et Döring R.** (1997). "*Nouveaux développements dans la fabrication de nappes pour les feutres de papeteries.*" IBT non-tissés, (n°3): pp 53-56.
- Swain G. E.** (1980). "*Behaviour of press felts in compression.*" Tappi journal, vol. n° 63(n°9): pp 85-88.
- Sweet J. S.** (1961). "*A basic study of water removal at the press.*" Pulp and paper magazine of Canada, (n°7): pp T367-T371.
- Sze D. H.** (1986). "*Measuring wet press felt pressure uniformity and its effects on sheet solids.*" Tappi journal, (n° 4).
- Talja R.** (1996). "*Pressing and drying developments.*", 82nd annual meeting, Technical section, CPPA proceedings, pp B225-B229.
- Toney M. M.** (2000). "*Computer modeling of fibrous structures.*" Journal of textile institute, n°91 part 1(n°3): pp 133-139.
- Tour M.** (1999). "*The advent of the paper machine.*", Dernier accès le: 23/02. <http://www.ipst.edu/amp/machine.html>
- Underwood E. E.** (1970). "*Quantitative stereology.*", livre édité par Addison Wesley publishing compagny.
- Valette P. et Choudens C.** (1987). "*Le bois, la pâte, le papier.*", Grenoble, livre édité par le centre technique du papier.
- Vappula R., Tiikila J., et al.** (1998). "*Press fabrics.*", Papermaking science and technology, Papermaking part 1.
- Vermeersch O. G.** (1997). "*Contribution à l'étude des propriétés physiques et hydrauliques des géotextiles de type non-tissés aiguilletés.*", Thèse en Science de l'ingénieur. Mulhouse, Université de Haute Alsace.
- Vomhoff H., Martinez D. M., et al.** (2000). "*The transversal steady-state permeability of a fibre web compressed between rough permeable surface.*" Journal of Pulp and Paper Science, vol n°26(n°12): pp 428-436.
- Wahlström B. J.** (1960). "*A long term study of water removal and moisture distribution on a Newsprint machine press section - Part 2.*" Pulp and paper magazine of Canada, (n°9): pp T418-T451.
- Wahlström B. J., Johnson A., et al.** (1969). "*Our present understanding of the fundamentals of pressing.*" Pulp and paper magazine of Canada, vol. n°70(n°19): pp 76-96.
- Walker K.** (1990). "*Advances in hot pressing technology.*" Tappi journal, Vol. 73(n°8): pp 99-101.
- Weitzenböck J. R., Shenoï R. A., et al.** (1998). "*Measurement of the three-dimensional permeability.*" Composites, Part A(29A): pp 159-169.
- Westra H. A.** (1975). "*A new contribution to press nip analysis.*", International Water Removal Symposium proceedings, London, pp 66-88.

- Wheeldon J. B. et Hoyland R. B.** (1979). “*Modern felt designe and sheet consolidation.*”, Eucepa proceedings, London
- Wicks L.** (1982). “*The influence of pressing on sheet two sideness.*” Tappi journal, vol. n°65(n°9): pp 55-60.
- Wilder J. E.** (1967). “*The fluid mechanics of plain press nips.*” Tappi journal, vol. 50(n° 3): pp 180-186.
- Wiseman N.** (1976). “*Water removal in wet pressing : the effect of press loading.*”, Tappi engineerieng conference proceedings, pp 51-55.
- Worsick A.** (1994). “*Developments in pres technology.*”, Press technology proceedings, pp 30-35.
- Wrist P. E.** (1964). “*The present state of our knowledge of the fundamentals of wet pressing.*” Pulp and paper magazine of Canada, vol.(n° 7): pp 284-296.
- Wyckoff R. D. et Botset H. G.** (1936). “*The flow of gas-liquid mixtures through unconsolidated sands.*” Physics, (n°9): pp 325-345.
- Xu K.** (1995). “*Structures multiéchelles, Modèles pour la description des matériaux poreux et l'estimation de leurs propriétés de transport.*”, Thèse en Mécanique. Grenoble, Université Joseph Fourier.
- Yamamoto H.** (1978). “*Effect of uniformity of pressure application on the moisture content of wet paper sheet in pressing.*”.
- Yeager R.** (1997). “*Optimiser les section de presses.*” La papeterie, vol. 4(n° 208): pp 19-23.
- Yli-Kaupila J.** (1993). “*How to improve wet pressing.*”, Wet pressing proceedings, pp 29-33.
- Young W.-B. et Wu F.** (1995). “*Permeability measurement of bidirectional woven glass fibers.*” Journal of reinforced plastics and composites, Vol. n°14(n°10): pp 1108-1120.
- Zhu S., Pelton R. H., et al.** (1995). “*Mechanistic modelling of fluid permeation through compressible fiber beds.*” Chemical engineering science, 50(n°22): pp 3557-3572.

# ANNEXE A : PLAN DU PERMÉAMÈTRE.

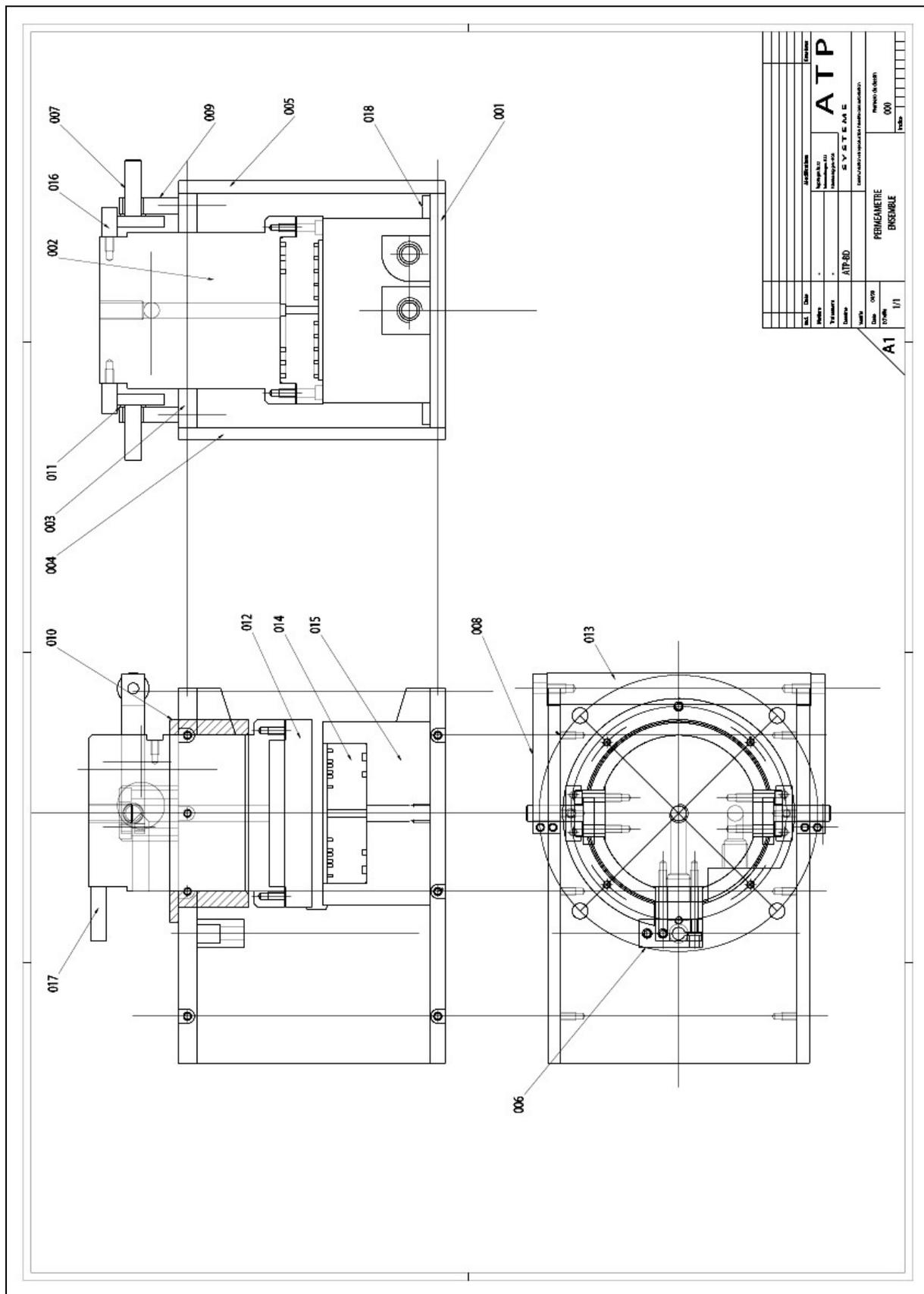


Figure A-1 : Plan du perméamètre. La cellule est configurée pour des mesures de perméabilité transversale.

N° Plan	DÉSIGNATION	Qte
18	CENTREUR	1
17	BUTÉE DE CAPTEUR	1
16	BUTÉE D'EXCENTRIQUE	2
15	BASE	1
14	DIFFUSEUR INF	1
13	POIGNÉE	1
12	PORTE FRITTÉ SUP.	1
11	RONDELLE	2
10	GUIDE PISTON	1
09	PALIER	2
08	PINCE D'EXCENTRIQUE	2
07	EXCENTRIQUE	2
06	SUPPORT CAPTEUR	1
05	PLAQUE LATÉRALE	1
04	PLAQUE LATÉRALE	1
03	PLAQUE SUPERIEURE	1
02	PISTON	1
01	PLATINE DE BASE	1

Tableau 19 : Nomenclature des pièces du perméamètre référençant la figure A-1.

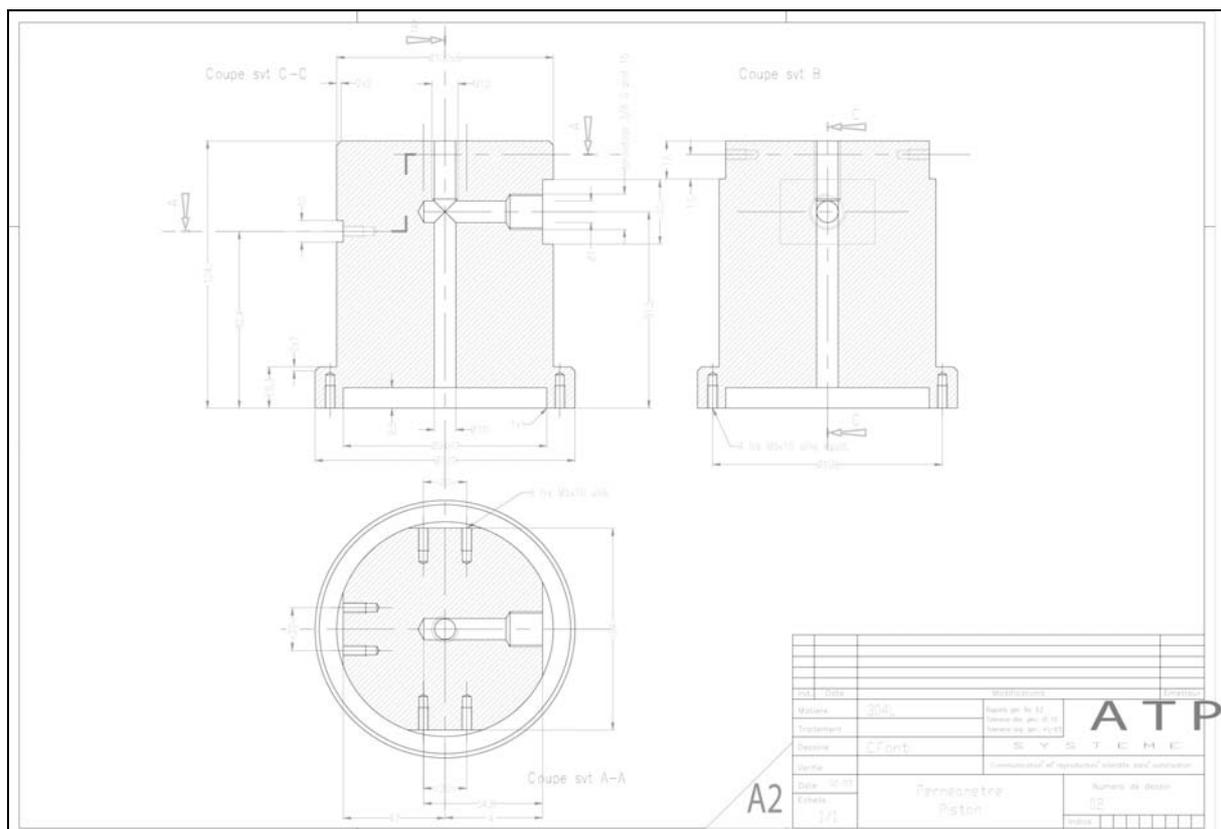


Figure A-2 : Plan du piston du perméamètre.

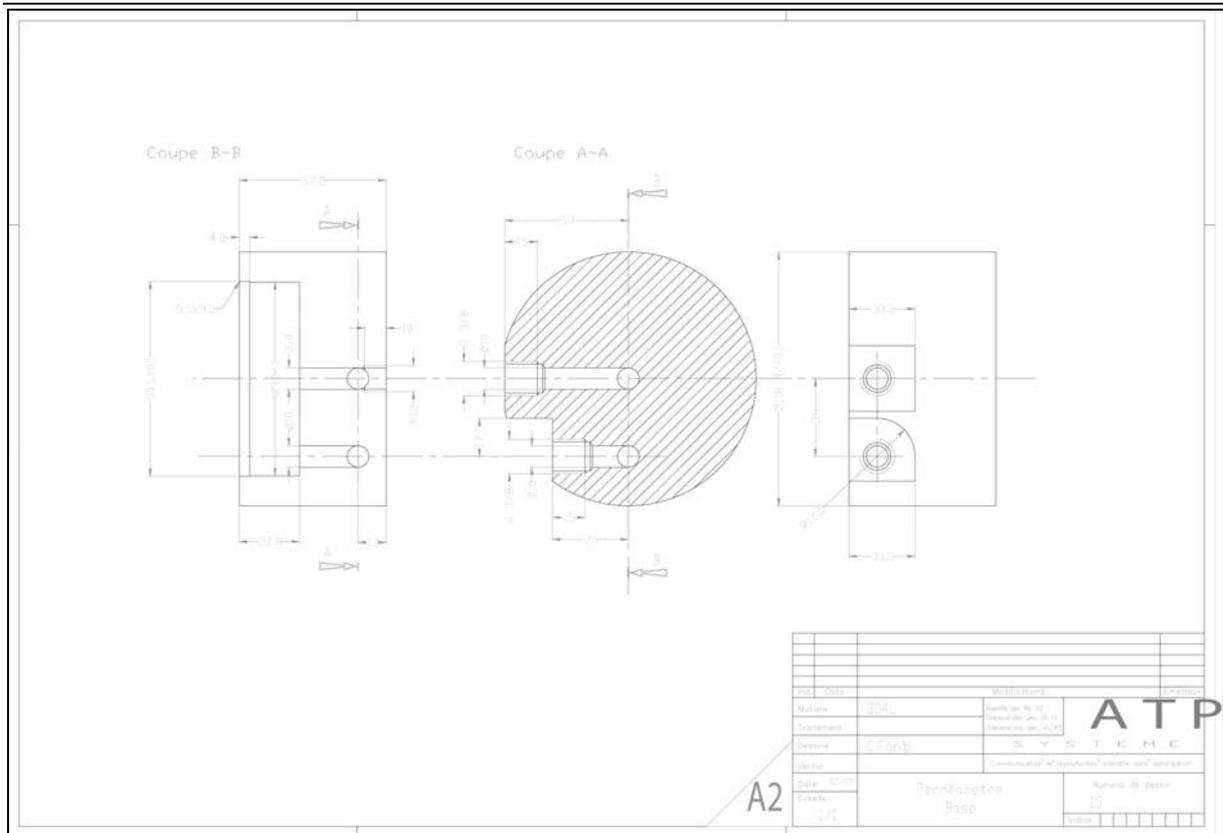


Figure A-3 : Base du perméamètre.

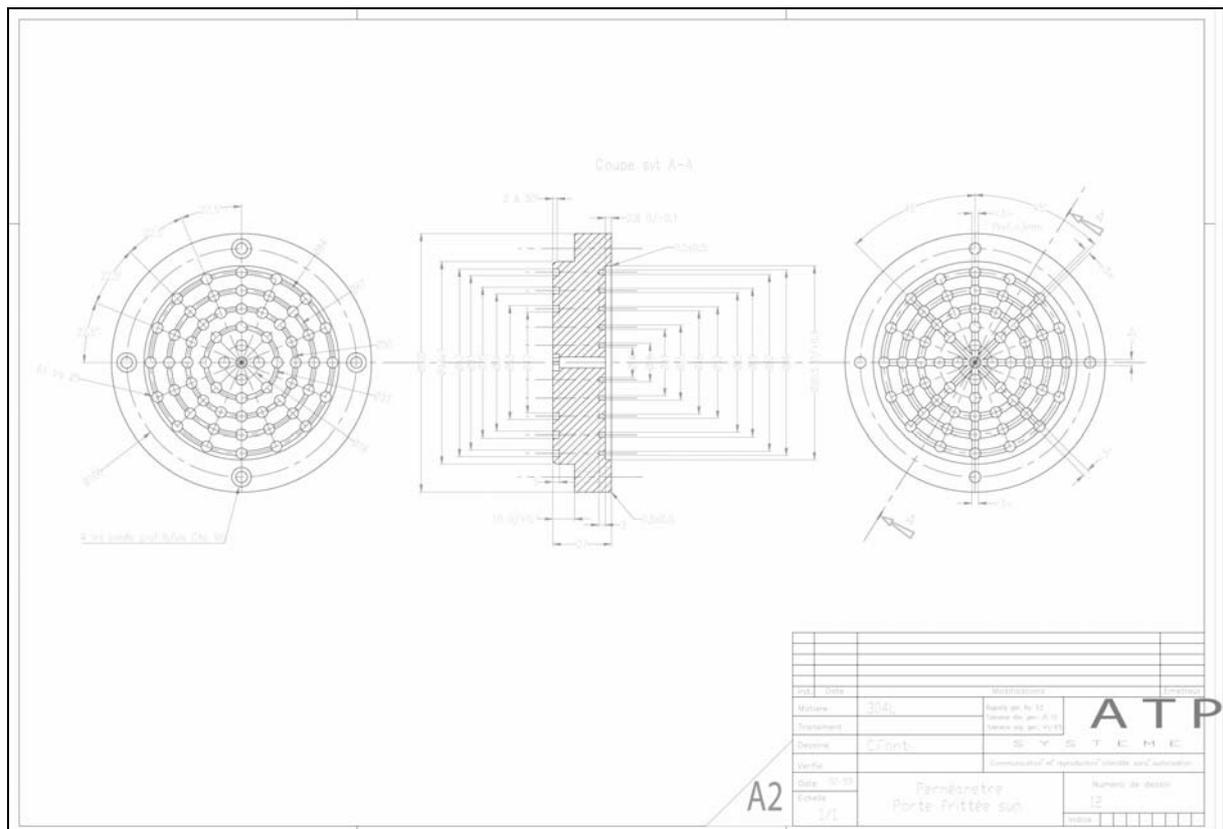


Figure A-4 : Porte frittée supérieur. Il répartit les contraintes lors de mesures de perméabilité transversale.

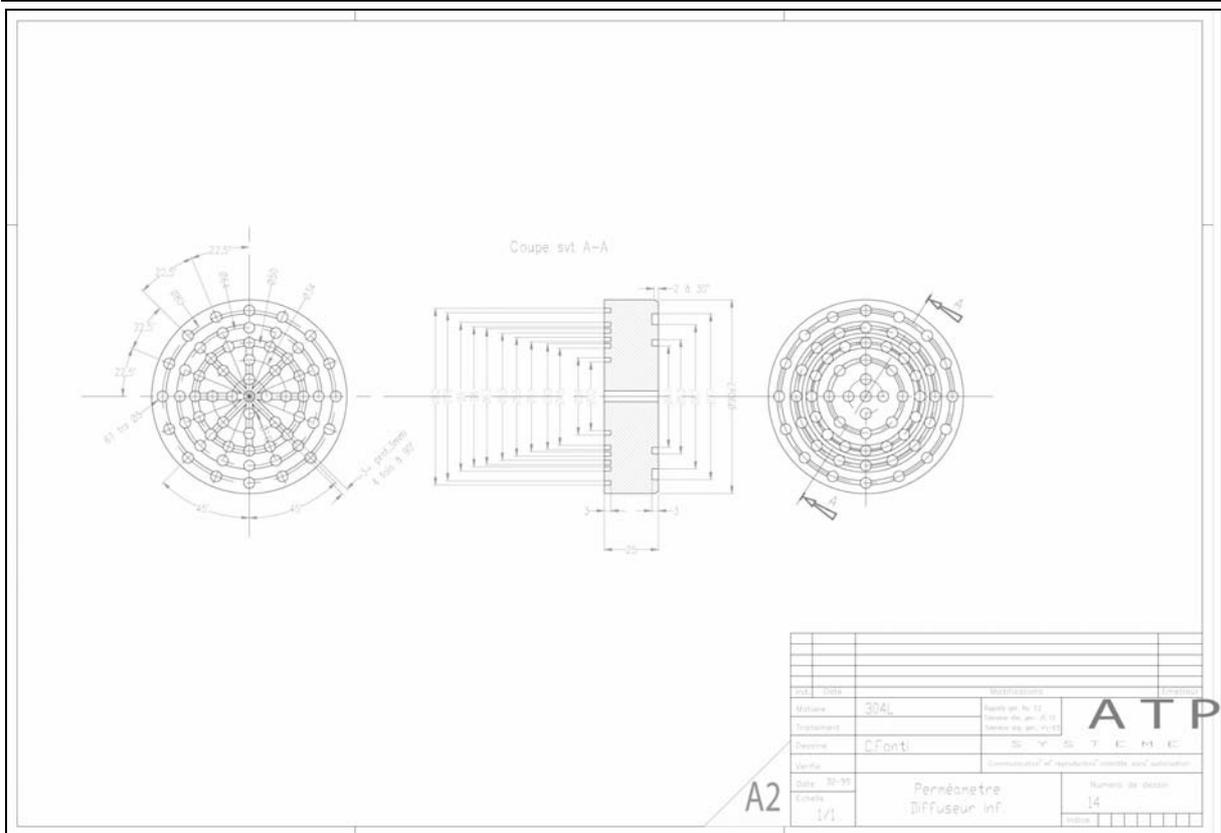


Figure A-5 : Diffuseur inférieur utilisé lors des mesures de perméabilité transversale.

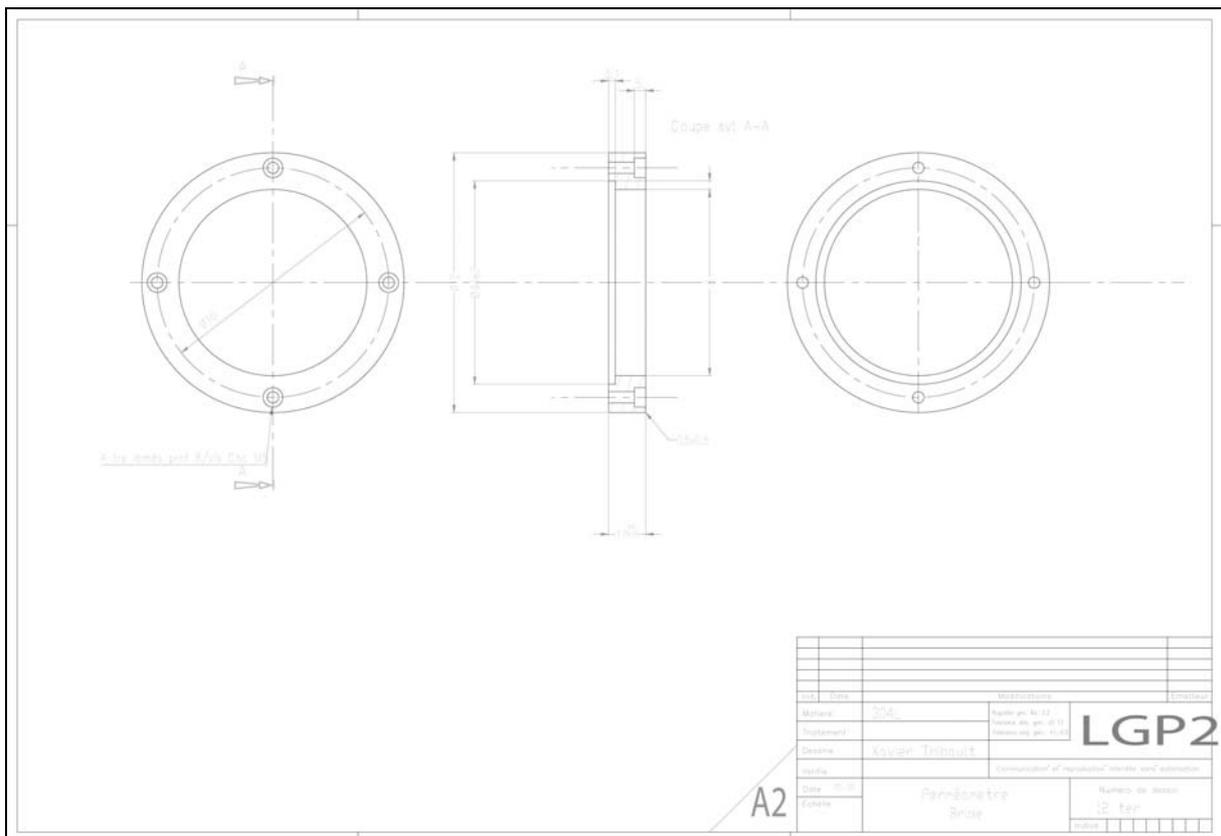


Figure A-6 : Bride utilisée pour les mesures de perméabilité longitudinale. Elle maintient le répartiteur supérieur contre le piston.

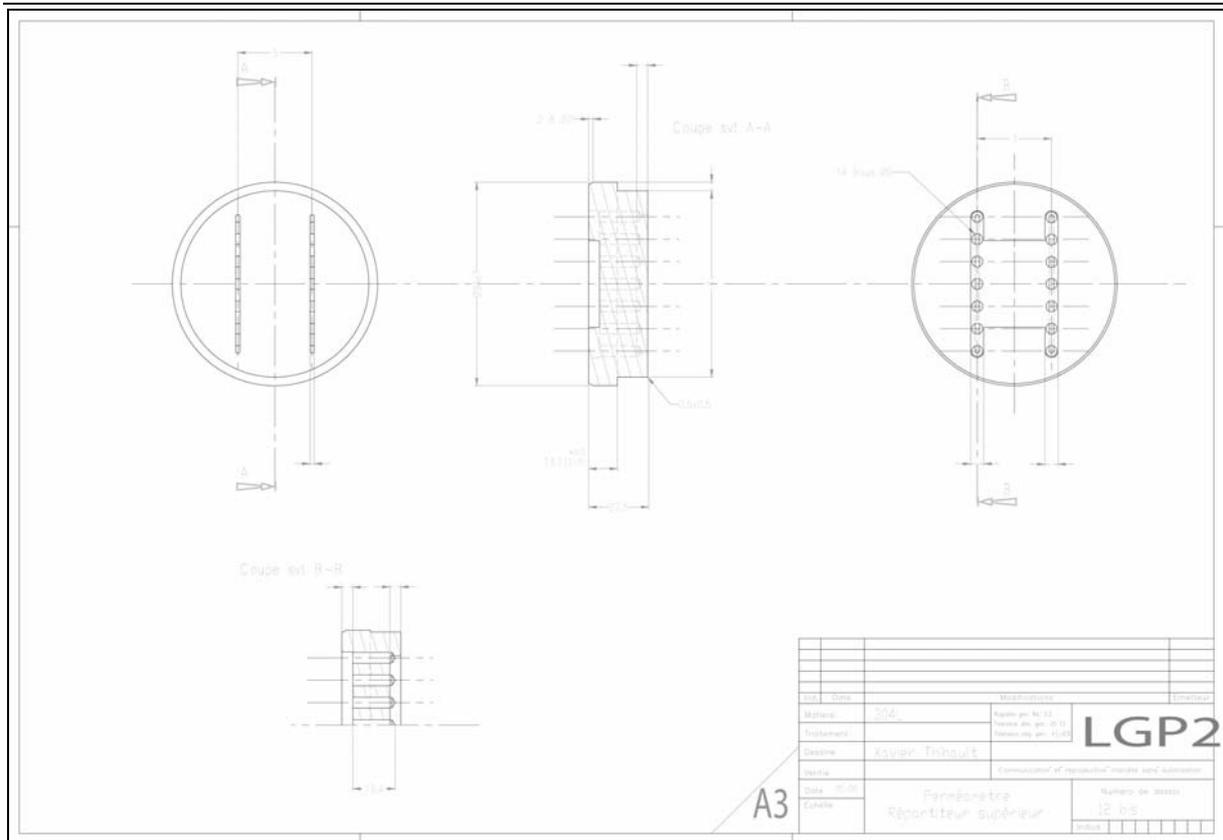


Figure A-7 : Répartiteur supérieur utilisé pour les mesures de perméabilité longitudinale.

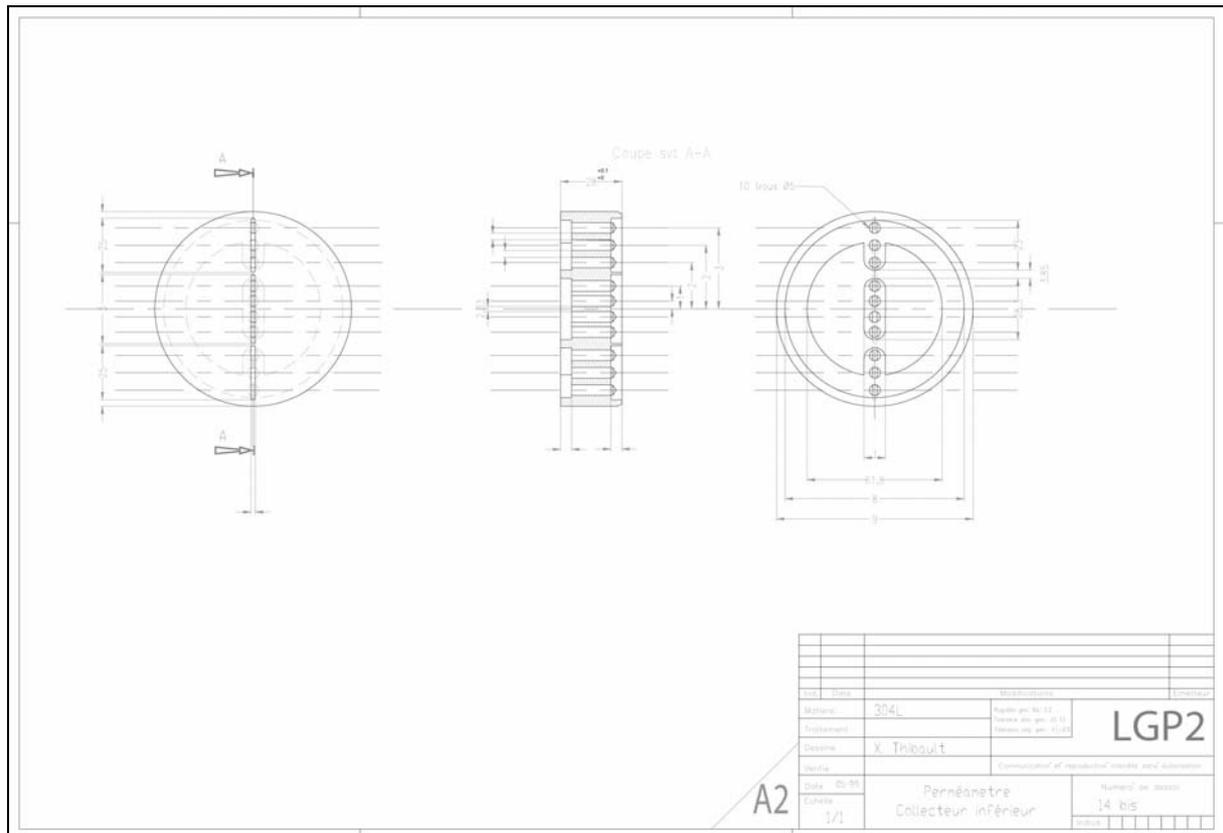


Figure A-8 : Collecteur inférieur utilisé pour les mesures de perméabilité longitudinale.



## ANNEXE B : DESCRIPTION DES FEUTRES.

### Feutre A1

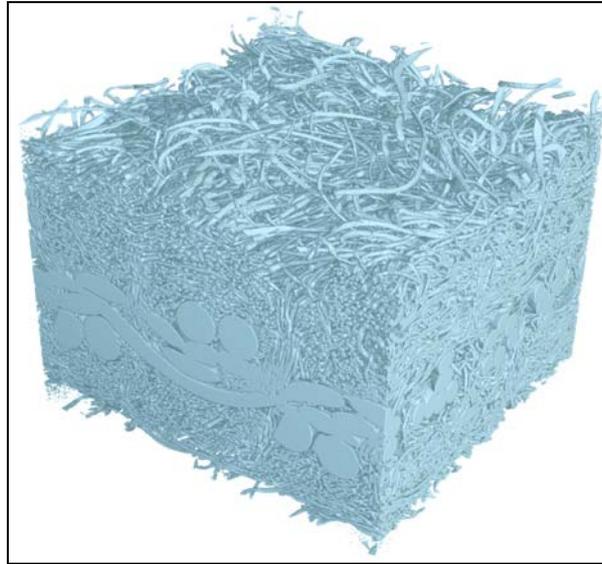


Figure B-1 : Volume de feutre A1 reconstruit par microtomographie aux rayons X.

Grammage total :  $1230 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Grammage du canevas :  $420 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Grammage des voiles :  $810 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Diamètre moyen des fibres des voiles :  $30 \mu\text{m}$

Simple canevas : sens marche : fils mono-filaments retordus  $0,20 \text{ mm} \times 2 \times 3$ .

sens travers : fils mono-filaments  $0,40 \text{ mm}$ .

### Feutre A2

Grammage total :  $1235 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Grammage du canevas :  $420 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Grammage des voiles :  $815 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Diamètre moyen des fibres des voiles :  $30 \mu\text{m}$

Simple canevas : sens marche : fils mono-filaments retordus  $0,20 \text{ mm} \times 2 \times 3$ .

sens travers : fils mono-filaments  $0,40 \text{ mm}$ .

## Feutre A3

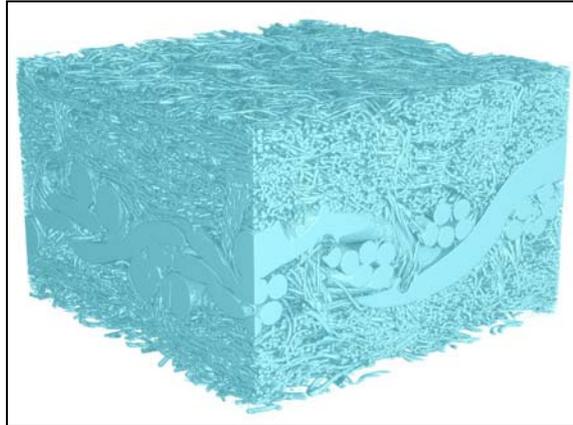


Figure B-2 : Volume de feutre A3 reconstruit par microtomographie aux rayons X.

Grammage total :  $1210 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Grammage du canevas :  $420 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Grammage des voiles :  $490 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Diamètre moyen des fibres des voiles :  $30 \mu\text{m}$

Simple canevas : sens marche : fils mono-filaments retordus  $0,20 \text{ mm} \times 2 \times 3$ .

sens travers : fils mono-filaments  $0,40 \text{ mm}$ .

## Feutre A4

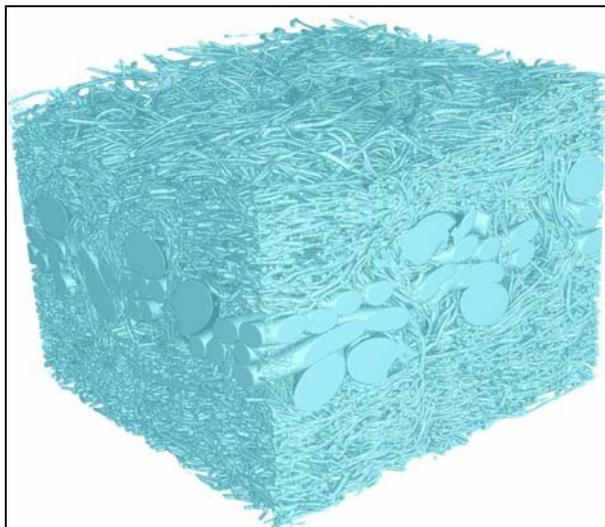


Figure B-3 : Volume de feutre A4 reconstruit par microtomographie aux rayons X.

Grammage total :  $1245 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Grammage du canevas :  $420 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Grammage des voiles :  $825 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Diamètre moyen des fibres des voiles :  $30 \mu\text{m}$

Simple canevas : sens marche : fils mono-filaments retordus  $0,20 \text{ mm} \times 2 \times 3$ .

sens travers : fils mono-filaments  $0,40 \text{ mm}$ .

### **Feutre A221**

Grammage total : 1550 kg.m<sup>-2</sup>.

### **Feutre A249**

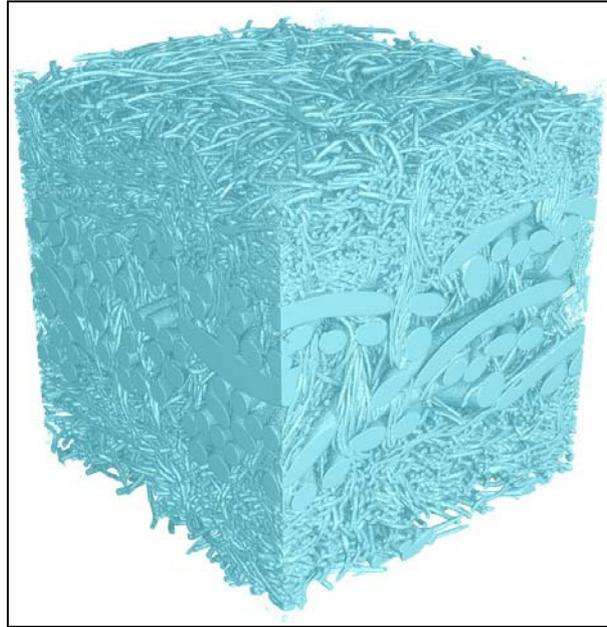
Grammage total : 1380 kg.m<sup>-2</sup>.

Grammage du canevas : 660 kg.m<sup>-2</sup>.

Grammage des voiles : 720 kg.m<sup>-2</sup>.

Double canevas : sens marche 2x2x0,20 mm, sens travers 0,25 mm.

### **Feutre B1**



**Figure B-4 : Volume de feutre B1 reconstruit par microtomographie aux rayons X.**

Grammage total : 1600 kg.m<sup>-2</sup>.

Grammage du canevas : 890 kg.m<sup>-2</sup>.

Grammage des voiles : 710 kg.m<sup>-2</sup>.

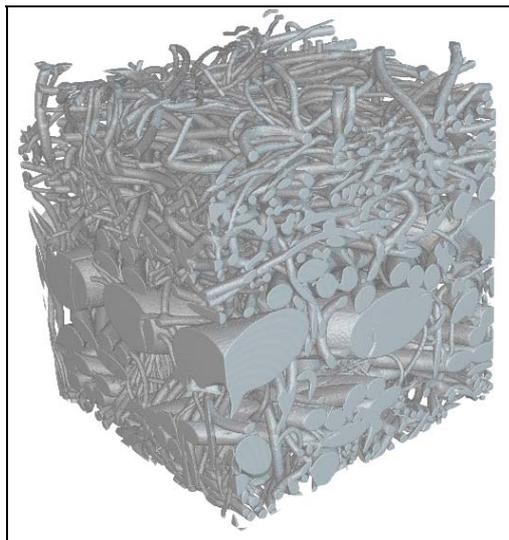
Diamètre moyen des fibres des voiles : 35 µm

Double canevas :

Canevas coté papier : armature satin 4, sens marche : fils retordus 0,2x2x3 mm,  
sens travers : fils mono-filaments 0,30 mm.

Canevas coté rouleau : armature double satin 4, même fils que ci-dessus.

## Feutre B2



**Figure B-5 : Volume de feutre B2 reconstruit par microtomographie aux rayons X.**  
Grammage total :  $1600 \text{ kg.m}^{-2}$ .

## ANNEXE C : RHÉOLOGIE DES FEUTRES.

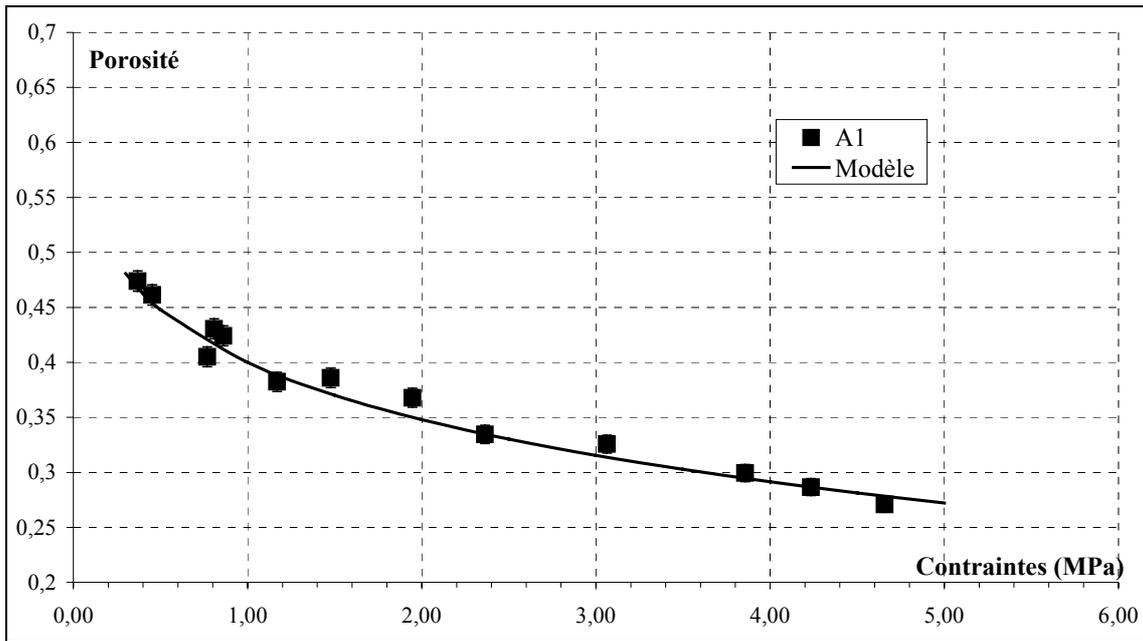


Figure C-1: Évolution de la porosité du feutre A1 pendant sa compression.

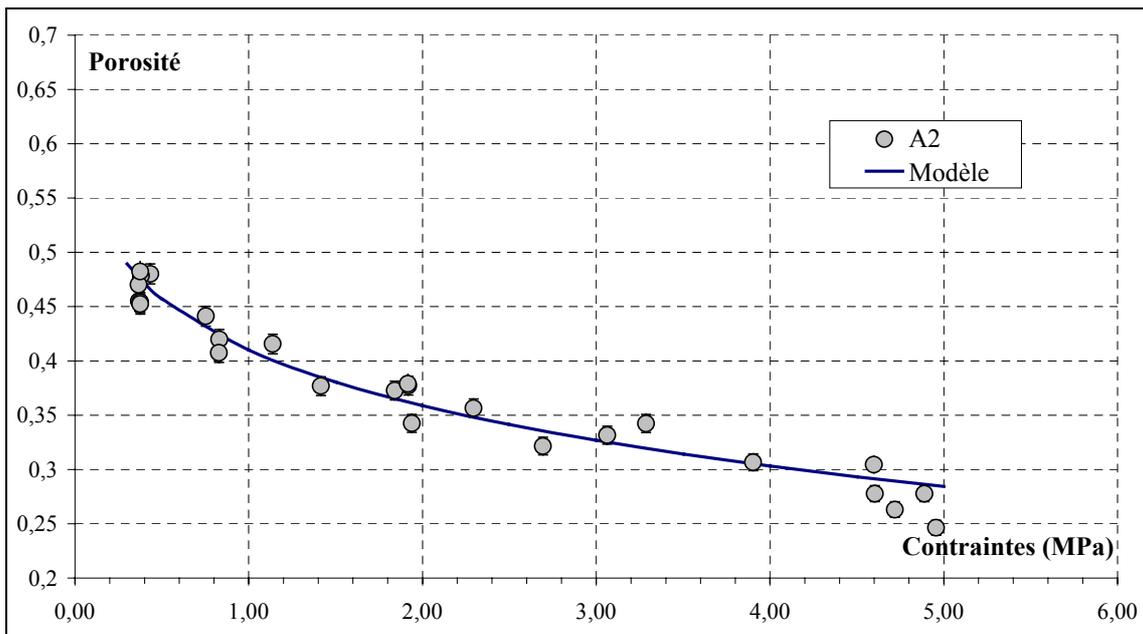


Figure C-2: Évolution de la porosité du feutre A2 pendant sa compression.

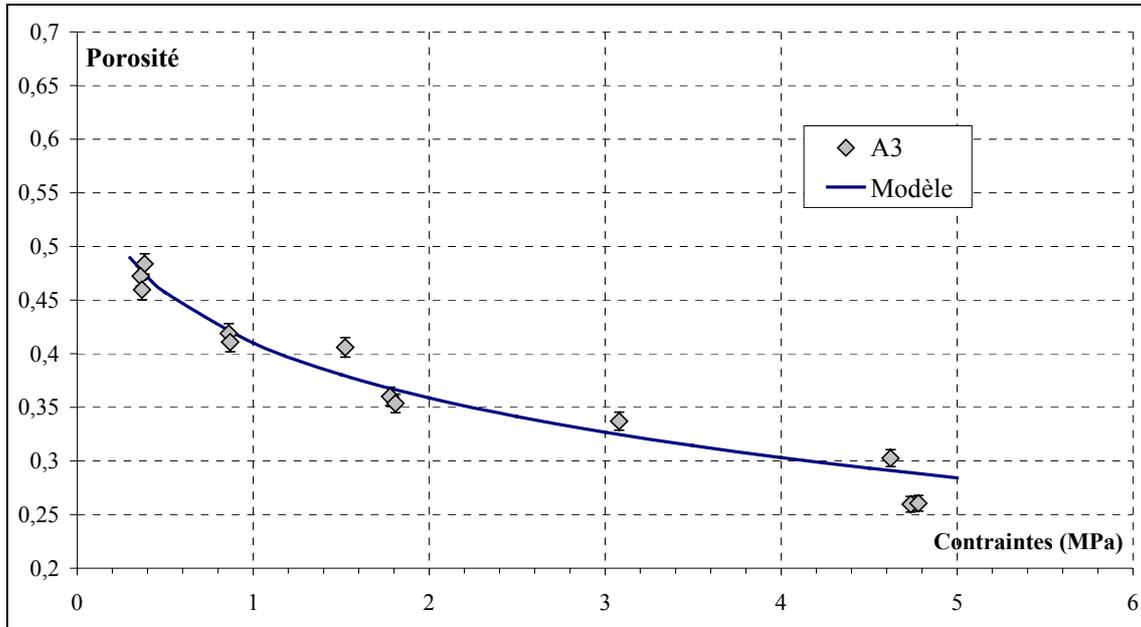


Figure C-3: Évolution de la porosité du feutre A3 pendant sa compression.

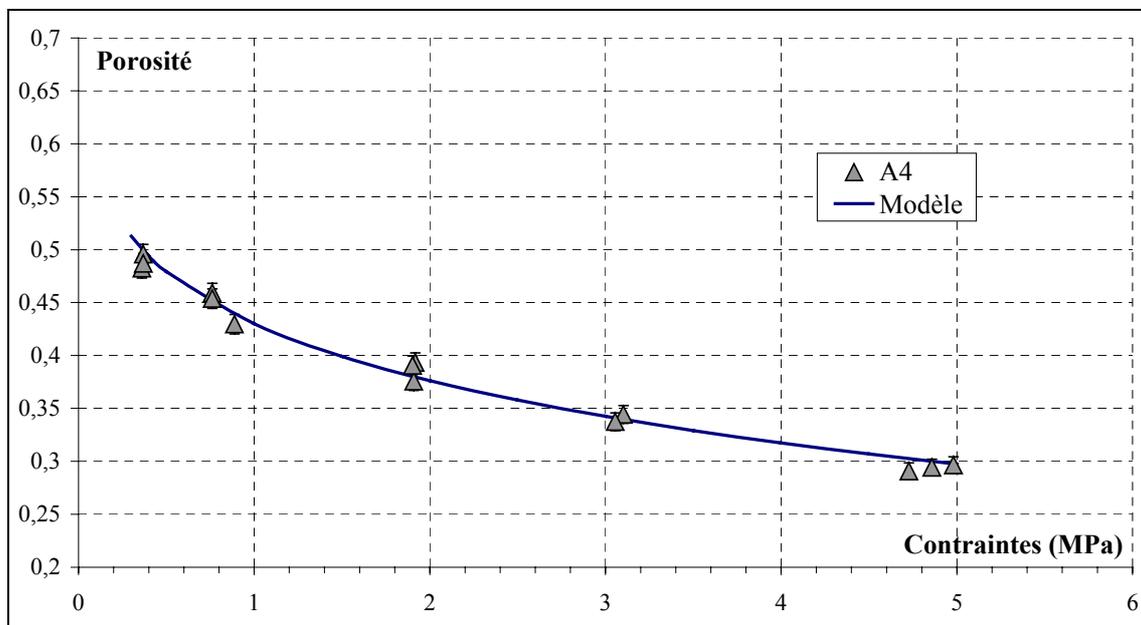


Figure C-4: Évolution de la porosité du feutre A4 pendant sa compression.

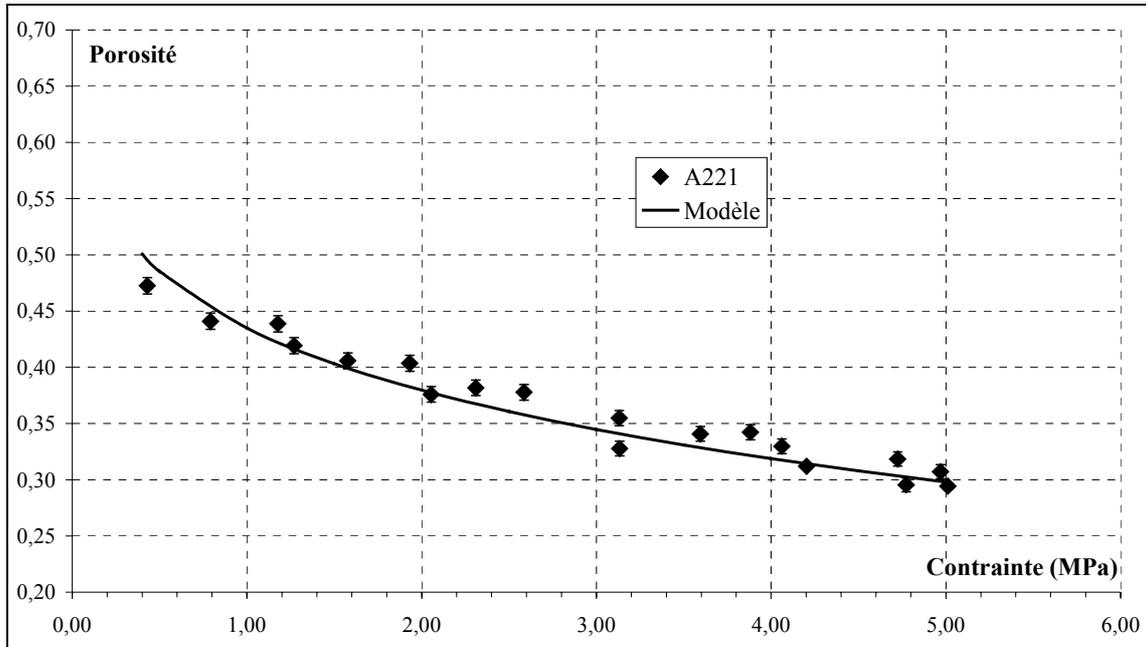


Figure C-5: Évolution de la porosité du feutre A221 pendant sa compression.

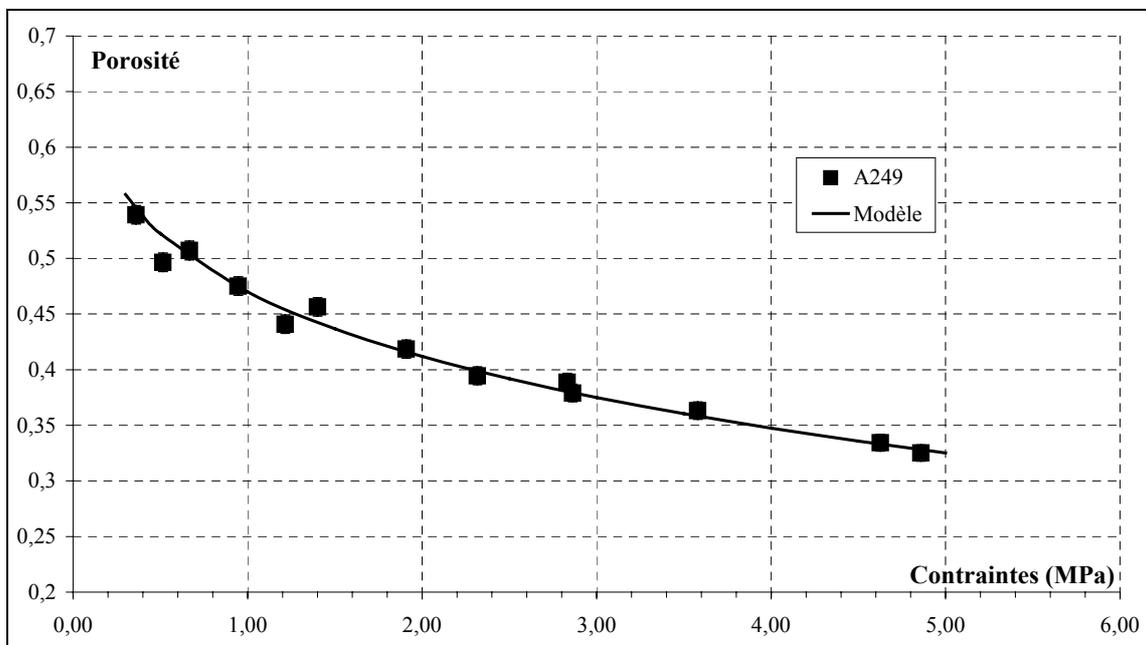


Figure C-6: Évolution de la porosité du feutre A249 pendant sa compression.

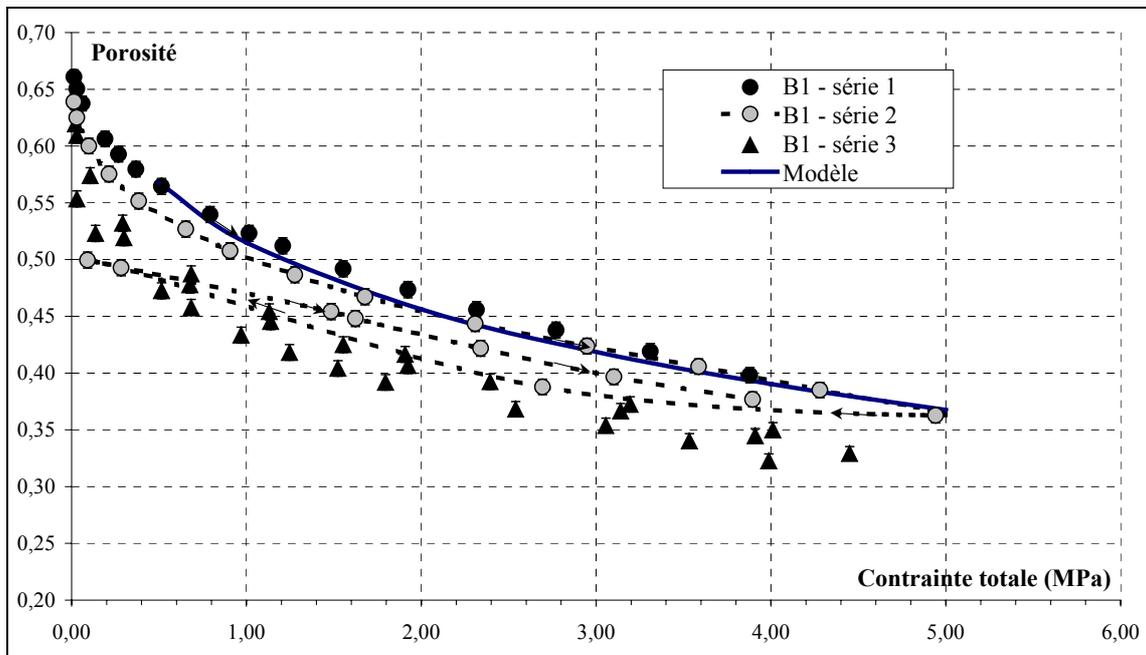


Figure C-7: Évolution de la porosité du feutre B1 pendant sa compression.

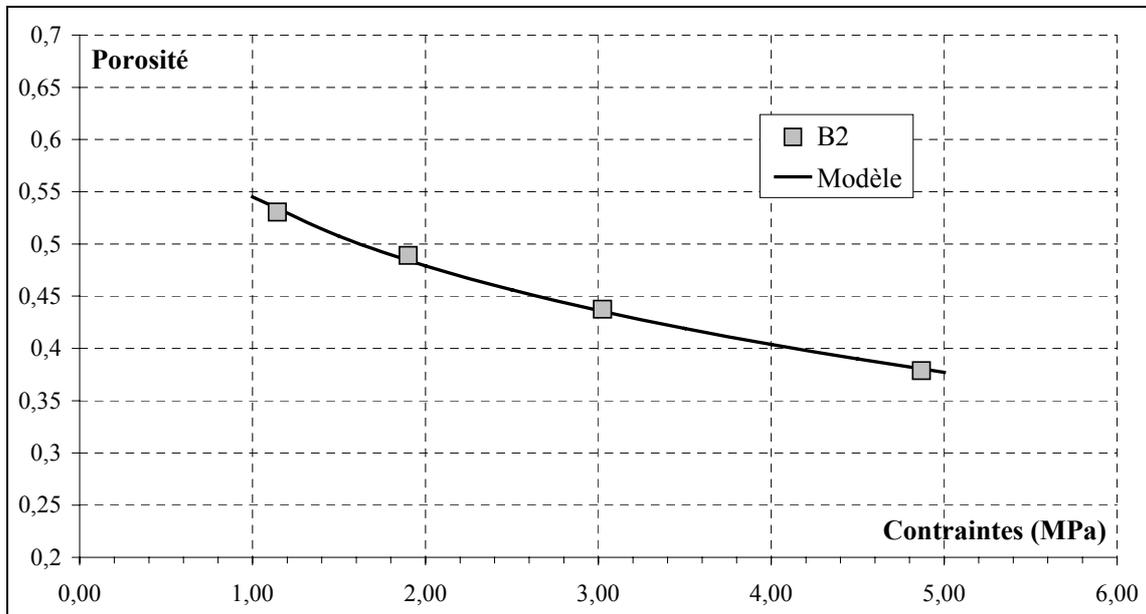


Figure C-8: Évolution de la porosité du feutre B2 pendant sa compression.

## ANNEXE D : RÉSULTATS DES MESURES DE POROSIMÉTRIE AU MERCURE.

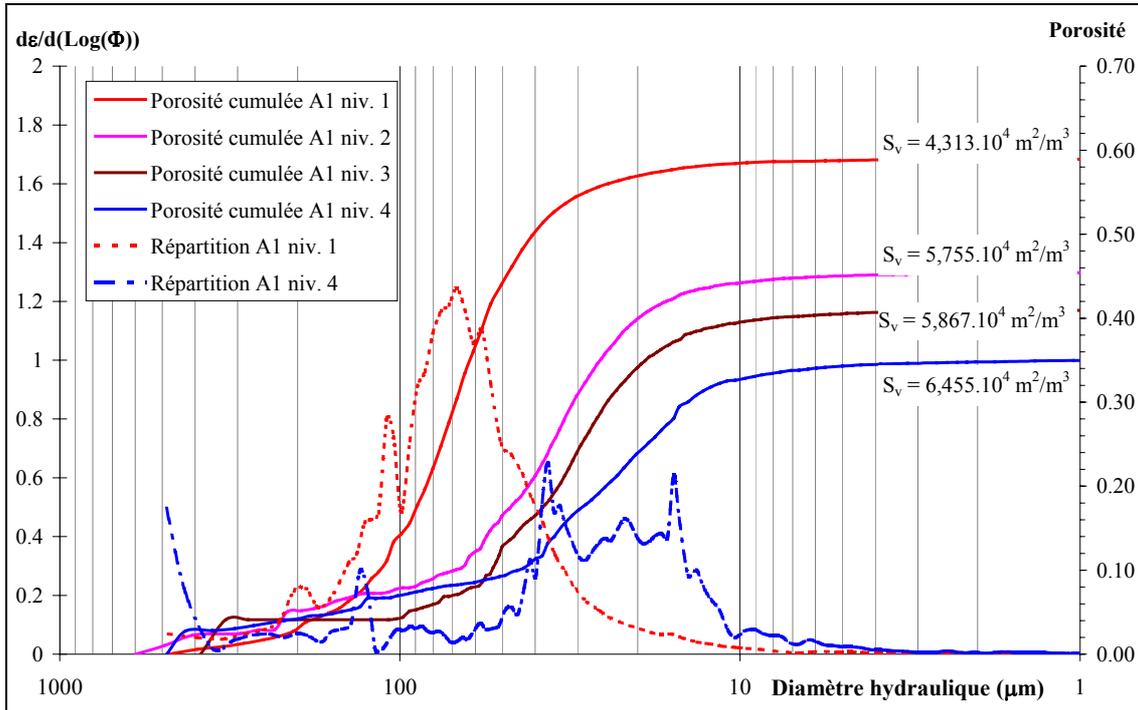


Figure D-1 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre A1. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations.

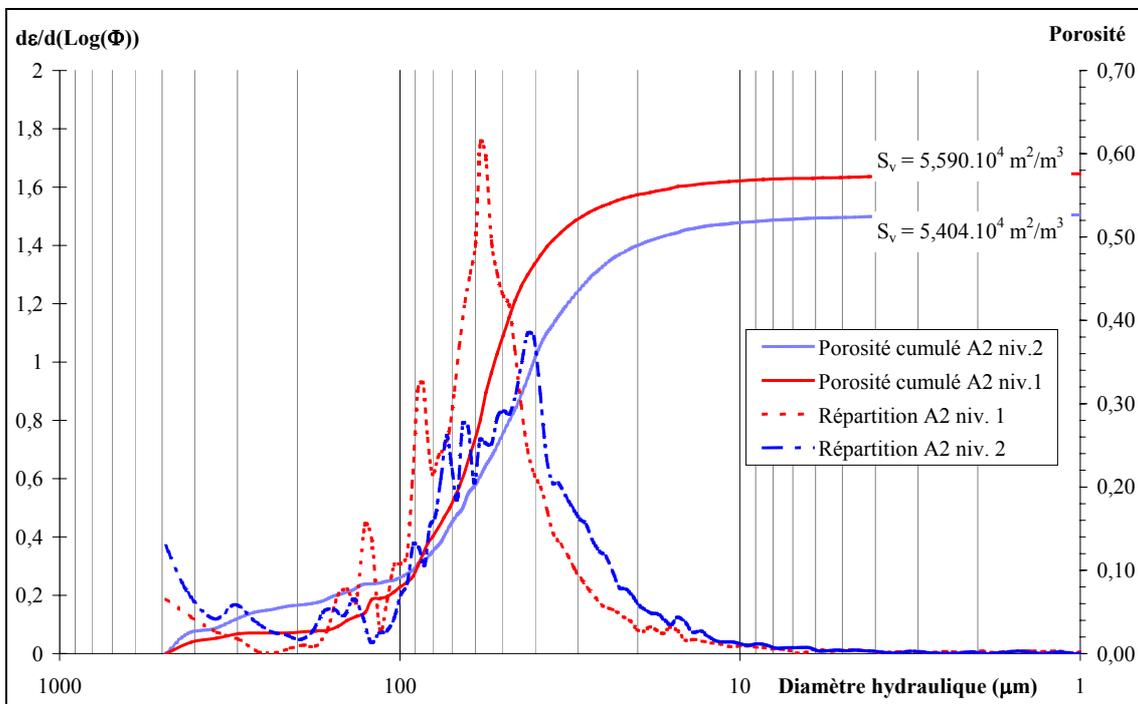


Figure D-2 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre A2. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations.

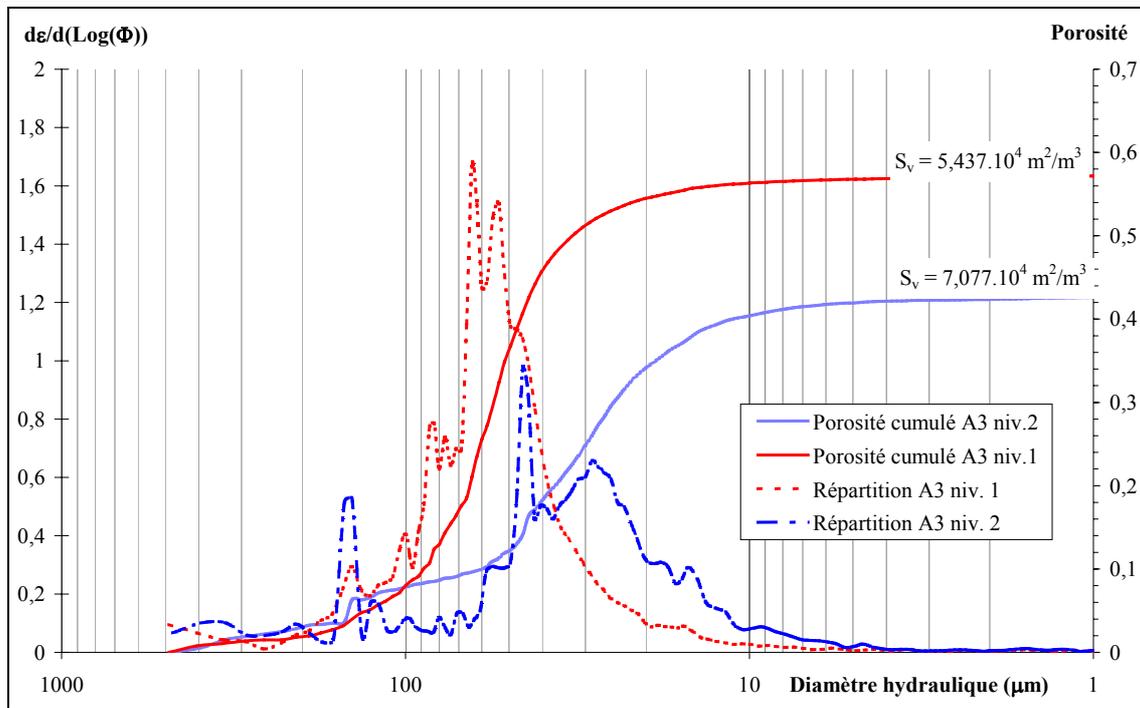


Figure D-3 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre A3. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations.

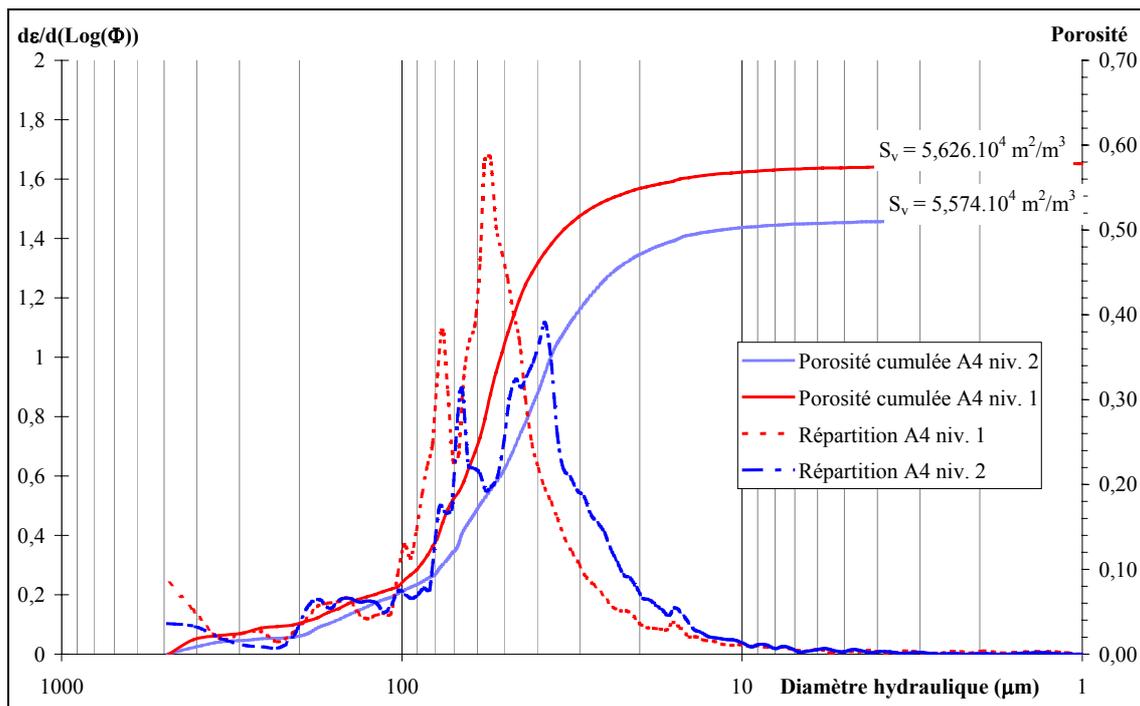
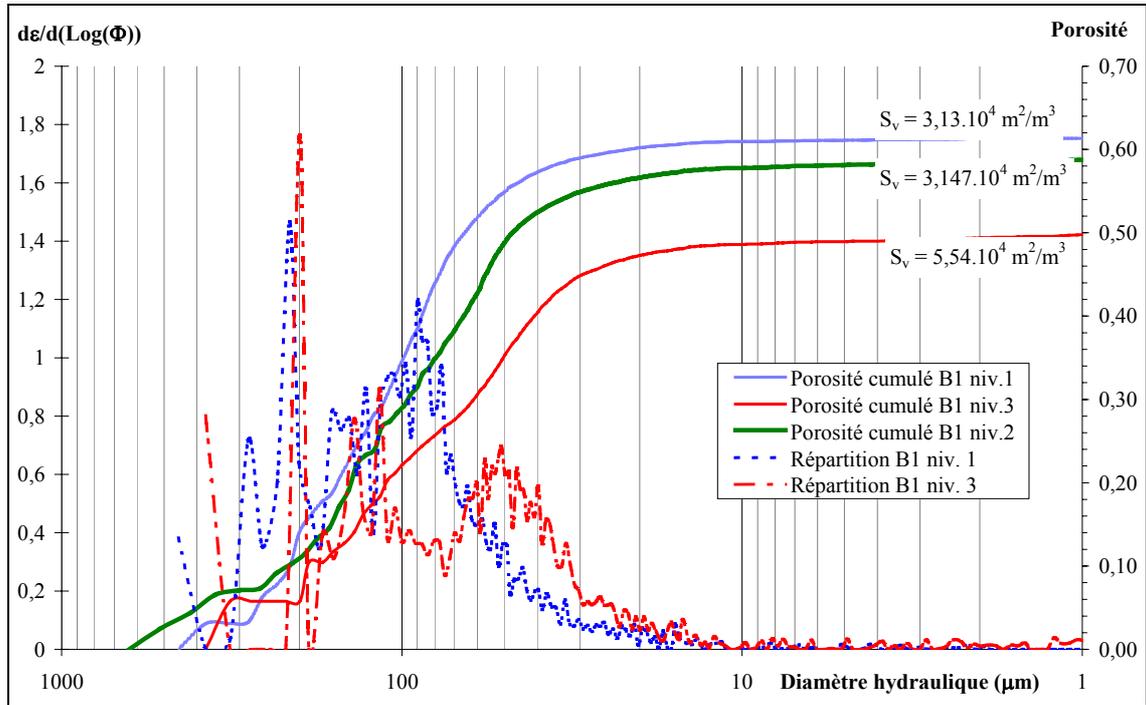


Figure D-4 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre A4. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations.



**Figure D-5 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre B1. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations.**



# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## Chapitre I : La pressage.

Figure I-1 : Comparaison des fibres de feuillus et de résineux d'après (Aitken Y., Cadel F. & al. 1988).....	15
Figure I-2 : Image de la surface d'une feuille de papier prise au microscope électronique à balayage.....	16
Figure I-3 : Schéma d'une machine à papier.....	17
Figure I-4 : Calcul de l'impulsion d'une pince.....	22
Figure I-5 : Illustration du fonctionnement d'une presse pleine.....	23
Figure I-6 : Illustration du fonctionnement d'une presse aspirante.....	24
Figure I-7 : Carte des perforations sur un rouleau de presse aspirante.....	24
Figure I-8 : Illustration du fonctionnement d'une presse à toile.....	25
Figure I-9 : Schéma d'un rouleau porteur d'une presse rainurée.....	25
Figure I-10 : Schéma d'un rouleau porteur d'une presse à trous borgnes.....	26
Figure I-11 : Illustration du fonctionnement d'une presse à sabot.....	28
Figure I-12 : Comparaison de l'impulsion mécanique de pressage d'une presse pleine et d'une presse à sabot. D'après (Lange D. 1996).....	28
Figure I-13 : Distributions des contraintes et évolution de l'épaisseur de la feuille de papier lors du pressage dans une presse aspirante (d'après Nilsson et Larsson).....	32
Figure I-14 : Influence du feutre sur la production.....	38
Figure I-15 : Formule chimique du Nylon 6-6.....	40
Figure I-16 : Formule chimique du Grilon.....	40
Figure I-17 : les principaux types de fils utilisés pour le canevas.....	41
Figure I-18 : Tissage du canevas.....	42
Figure I-19 : Exemple de tissage simple (reconstruction avec Matlab <sup>®</sup> ).....	42
Figure I-20 : Schéma illustrant le cardage.....	42
Figure I-21 : Exemple d'aiguille utilisée pour l'aiguilletage (Vermeersch O. G. 1997).....	43
Figure I-22 : Endommagement du canevas (armature double) par l'aiguilletage. Les voiles du feutre ont été enlevés.....	44

## Chapitre II : Conception du perméamètre.

Figure II-1 : Schéma du fonctionnement d'un perméamètre de type Frazier. ....	56
Figure II-2 : Schéma de fonctionnement des perméamètres à écoulement unidirectionnel ou radial. ....	57
Figure II-3 : Perméamètre de Lundström et Gebart. ....	59
Figure II-4 : Photographie de l'appareille et de la presse .....	65
Figure II-5 : Courbe d'étalonnage du vérin pneumatique utilisé pour comprimer le perméamètre. ....	65
Figure II-6 : Schéma simplifié du perméamètre et de son équipement.....	66
Figure II-7 : Simulation de l'écoulement dans la cellule dédiée à la perméabilité transversale, Cas de la perte de charge maximale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches. ....	67
Figure II-8 : Simulation de l'écoulement dans la cellule dédiée à la perméabilité transversale, Cas de la perte de charge minimale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches. ....	67
Figure II-9 : Simulation de l'écoulement dans la cellule dédiée à la perméabilité longitudinale, Cas de la perte de charge minimale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches. ....	68
Figure II-10 : Simulation de l'écoulement dans la cellule dédiée à la perméabilité longitudinale, Cas de la perte de charge minimale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches. ....	69
Figure II-11 : plan d'ensemble du perméamètre. ....	70
Figure II-12 : Photographie de l'appareil construit permettant de mesurer la perméabilité de textile. ....	70
Figure II-13 : L'analyse de plusieurs essais successifs révèle l'encrassement des plaques poreuses. La dépression imposée est divisée par la viscosité de l'eau afin de s'affranchir de l'influence de la température. ....	72
Figure II-14 : Simulation numérique du champ de pression inférieure à 1 atm dans le perméamètre transversal. Pression amont 2 mCE. ....	74
Figure II-15 : Simulation numérique du champ de pression inférieure à 1 atm dans le perméamètre transversal. Pression amont 1 mCE. ....	74
Figure II-16 : Simulation numérique du champ de pression inférieure à 1 atm dans le perméamètre transversal. Pression 20 cmCE – -20 cmCE aval. ....	75
Figure II-17 : Comparaison des résultats de mesure de perméabilité avec et sans fuite latérale. ....	76
Figure II-18 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge divisé par la viscosité en fonction de la vitesse filtrante pour des essais avec et sans fuite latérale. ....	77
Figure II-19 : Évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse filtrante pour différents niveaux de déformation. Cas du perméamètre transversal. ....	78

Figure II-20 : Évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse filtrante pour différents niveaux de déformation du feutre. Cas du perméamètre longitudinal. ....	79
Figure II-21 : Évolution de la perte de charge du perméamètre à vide en fonction du débit traversant la zone de garde et de l'écart entre les disques fendus. Essais réalisés sans fuite latérale. ....	79
Figure II-22 : Comparaison de mesures de la perméabilité transversale avec une et deux épaisseurs de feutre. ....	81
Figure II-23 : Simulation de l'écoulement dans une section transversale de la cellule dédiée à la perméabilité longitudinale. Le champ de vitesse filtrante est représenté par des flèches. ....	83

### **Chapitre III : Résultats expérimentaux des mesures de perméabilité.**

Figure III-1 : Exemple de feutre avec un seul canevas. Ici le cas du feutre A1. ....	92
Figure III-2 : Illustration du canevas commun aux feutres A1, A2, A3 et A4. ....	92
Figure III-3 : Exemple de feutre avec des canevas superposés. Ici le cas du feutre B1. ....	92
Figure III-4 : Évolution de la porosité du feutre A1 pendant sa compression. ....	97
Figure III-5 : Évolution de la porosité du feutre A221 pendant sa compression. ....	97
Figure III-6 : Évolution de la porosité du feutre B1 pendant sa compression pour trois essais sur des échantillons différents. Les essais sont nommées série 1, 2 et 3. ....	98
Figure III-7 : Comparaison des résultats de modélisation. ....	99
Figure III-8 : Corrélation entre les paramètres du modèle et les paramètres de construction des feutres. ....	100
Figure III-9 : Photographie du FX3300, perméamètre à air. ....	102
Figure III-10 : Évolution de la perméabilité à l'air d'un feutre avec la dépression. ....	102
Figure III-11 : Perméabilité à l'air de quelques feutres. ....	103
Figure III-12 : Plan du perméamètre de Chevallier. L'étanchéité du feutre est obtenue par le serrage de quatre goujons (repère 4). ....	104
Figure III-13 : Photographie illustrant le perméamètre de Chevallier. Afin d'obtenir une déformation uniforme du feutre, le serrage doit être réparti le mieux possible. .	105
Figure III-14 : Comparaison des résultats des mesures sur le feutre B1 avec le nouvel appareil et le perméamètre de Chevallier. ....	105
Figure III-15 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre A1 lors de sa compression. ....	107
Figure III-16 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre A221 lors de sa compression. ....	107
Figure III-17 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre A249 lors de sa compression. ....	108
Figure III-18 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre B2 lors de sa compression. ....	108
Figure III-19 : Évolution de la perméabilité transversale du feutre B1 lors de sa compression. ....	109
Figure III-20 : Comparaison des comportements de la perméabilité transversale des feutres testés. ....	114
Figure III-21 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A1. ....	115
Figure III-22 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A2. ....	115

Figure III-23 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A3	116
Figure III-24 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A4	116
Figure III-25 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre A249	117
Figure III-26 : Détermination des axes et valeurs propres	117
Figure III-27 : Évolution de la perméabilité longitudinale lors de la compression du feutre B1.	119
Figure III-28 : Influence de la tension sur l'évolution de la perméabilité transversale lors de la compression du feutre A1. Le feutre est tendu à 233 daN.m <sup>-1</sup> , à 547 daN.m <sup>-1</sup> et à 853 daN.m <sup>-1</sup> .	121
Figure III-29 : Influence de la tension sur l'évolution de la perméabilité transversale lors de la compression du feutre A2. Le feutre est tendu à 233 daN.m <sup>-1</sup> , à 547 daN.m <sup>-1</sup> et à 853 daN.m <sup>-1</sup> .	122
Figure III-30 : Influence de la tension sur l'évolution de la perméabilité transversale lors de la compression du feutre A3. Le feutre est tendu à 233 daN.m <sup>-1</sup> , à 547 daN.m <sup>-1</sup> et à 853 daN.m <sup>-1</sup> .	122
Figure III-31 : Influence de la tension sur l'évolution de la perméabilité transversale lors de la compression du feutre A4. Le feutre est tendu à 233 daN.m <sup>-1</sup> , à 547 daN.m <sup>-1</sup> et à 853 daN.m <sup>-1</sup> .	123
Figure III-32: Comparaison des évolutions de la perméabilité transversale pour les feutres A1, A2, A3 et A4	123
Figure III-33 : Influence de la tension sur la perméabilité longitudinale sens marche.	125
<b>Chapitre IV : Analyse structurale.</b>	
Figure IV-1 : Description de l'appareil de l'ENSITM permettant la mesure de la conductibilité thermique.	130
Figure IV-2 : Modélisation des résultats expérimentaux par la loi d'Archie. Évolution du facteur de formation en fonction de $\varepsilon$ pour les grès de Fontainebleau, et en fonction de $(1-\varepsilon)$ pour les feutres non déformés. Chaque point représente un feutre différent dans un état non déformé.	132
Figure IV-3 : Corrélation entre le facteur de formation des feutres sans déformation et leur perméabilité à l'air.	132
Figure IV-4 : Goutte de fluide sur un support (en noir). Définition de l'angle de contact $\theta$ et de la tension superficielle $\gamma$ . a) fluide non mouillant, b) fluide mouillant	135
Figure IV-5 : Illustration de l'intrusion dans un capillaire d'un liquide non mouillant. Le fluide est en gris. Le gaz est incolore.	136
Figure IV-6 : Plan de la cellule de compression utilisée pour étudier l'influence de la déformation du feutre sur le réseau poreux.	140
Figure IV-7 : Résultats des mesures issues du porosimètre sur le feutre A1. Les courbes continues représentent la porosité cumulée du feutre en fonction du diamètre hydraulique. Les courbes en pointillés représentent les distributions des pores du feutre en fonction de leur diamètre hydraulique pour différents niveaux de déformation (représentés par la porosité finale mesurée).	141
Figure IV-8 : Comparaison des données expérimentales issues des mesures au porosimètre à mercure avec le modèle de distribution des diamètres hydrauliques de Faure.	144
Figure IV-9 : Plan des installations du synchrotron	147

Figure IV-10 : Illustration du fonctionnement des systèmes magnétiques et des spectres d'énergie résultants.....	148
Figure IV-11 : Illustration de l'ionisation de l'atome.....	149
Figure IV-12 : Illustration de l'absorption d'un photon dans l'effet Compton.....	150
Figure IV-13 : Illustration de l'évolution de l'atténuation massique avec l'énergie des photons. Indication du phénomène d'atténuation prédominant.....	152
Figure IV-14 : Illustration de l'évaluation de la transformée de Radon d'une section de matériau.....	153
Figure IV-15 : Schématisation du processus de mesures.....	154
Figure IV-16 : Photographie de la caméra CCD et du porte-échantillon.....	155
Figure IV-17: Illustration de la cellule de compression.....	155
Figure IV-18 : Étape d'échantillonnage d'un volume à partir de l'histogramme des niveaux de gris. Détermination du seuil de binarisation.....	156
Figure IV-19 : Reconstruction d'une section dans le canevas du feutre A1. Détermination de la taille des fils en pixels. (1 pixels équivaut à 6,6 $\mu\text{m}$ ).....	157
Figure IV-20 : Reconstruction du feutre A1. À gauche le feutre est non déformé. À droite le feutre est déformé.....	158
Figure IV-21 : Reconstruction du feutre B1. À gauche le feutre est non déformé. À droite le feutre est déformé.....	158
Figure IV-22 : À gauche vue de dessus du canevas du feutre B1, le diamètre des fils est de 0,2 et 0,3 mm. À droite vue de dessus du canevas du feutre A1, le diamètre des fils est de 0,2 et 0,4 mm. L'endommagement des mono-filaments du feutre A1 est mis en évidence.....	159
Figure IV-23 : Influence du seuil de binarisation sur la porosité du volume reconstruit de feutre A1. Illustration de la courbe par des images sections du feutre.....	159
Figure IV-24 : Évolution de la porosité selon l'épaisseur lorsque le feutre est déformé.....	160
Figure IV-25 : Vérification du programme par corrélation des grandeurs $R_i$ , $R_p$ et $R_f$ entre elles.....	162
Figure IV-26 : Enveloppe tridimensionnelle des sécantes dans les pores du feutre A1 pour le feutre non déformé (à gauche) et pour le feutre déformé (à droite).....	164
Figure IV-27 : Enveloppe tridimensionnelle des sécantes dans les fils et les fibres du feutre A1 pour le feutre non déformé (à gauche) et pour le feutre déformé (à droite)..	165
Figure IV-28 : Enveloppe tridimensionnelle des sécantes dans les pores du feutre B1 pour le feutre non déformé (à gauche) et pour le feutre déformé (à droite).....	165
Figure IV-29 : Enveloppe tridimensionnelle des sécantes dans les fils et les fibres du feutre B1 pour le feutre non déformé (à gauche) et pour le feutre déformé (à droite)..	165
Figure IV-30 : Évolution de la longueur moyenne des sécantes dans les pores pour différents niveaux de déformation du feutre A1.....	167
Figure IV-31 : Évolution de la longueur moyenne des sécantes dans les fibres pour différents niveaux de déformation du feutre A1.....	167
Figure IV-32 : Évolution de la longueur moyenne des sécantes dans les pores pour différents niveaux de déformation du feutre B1.....	168
Figure IV-33 : Évolution de la longueur moyenne des sécantes dans les fils et les fibres pour différents niveaux de déformation du feutre B1.....	169
Figure IV-34 : Évolution de la surface spécifique calculée à partir des reconstructions du feutre A1 issues de la microtomographie.....	170
Figure IV-35 : Évolution de la surface spécifique calculée à partir des reconstructions du feutre B1 issues de la microtomographie.....	170

Figure IV-36 : Fonction d'auto corrélation évaluée dans les directions x, y et z pour les volumes 1 et 2. 1 pixel équivaut à 6,6 $\mu\text{m}$ .....	175
Figure IV-37 : Illustration des sous-volumes principaux T1, T2 et T3 utilisées dans la simulation du transfert de chaleur dans la direction transversale.....	176
Figure IV-38 : Illustration du choix des sous-volumes. Les petits volumes ont comme dimensions 97 par 97 par 75 pixels. Le plus important a pour dimensions 582 par 97 par 375 pixels. ....	177
Figure IV-39 : Conditions aux limites employées dans le cadre de la modélisation du transfert thermique dans le volume sélectionné (en gris). ....	177

### **Annexe A : Plan du perméamètre.**

Figure A-1 : Plan du perméamètre. La cellule est configurée pour des mesures de perméabilité transversale.....	191
Figure A-2 : Plan du piston du perméamètre. ....	192
Figure A-3 : Base du perméamètre. ....	193
Figure A-4 : Porte fritté supérieur. Il répartit les contraintes lors de mesures de perméabilité transversale.....	193
Figure A-5 : Diffuseur inférieur utilisé lors des mesures de perméabilité transversale.....	194
Figure A-6 : Bride utilisée pour les mesures de perméabilité longitudinale. Elle maintient le répartiteur supérieur contre le piston. ....	194
Figure A-7 : Répartiteur supérieur utilisé pour les mesures de perméabilité longitudinale...	195
Figure A-8 : Collecteur inférieur utilisé pour les mesures de perméabilité longitudinale. ....	195

### **Annexe B : Description des feutres.**

Figure B-1 : Volume de feutre A1 reconstruit par microtomographie aux rayons X. ....	197
Figure B-2 : Volume de feutre A3 reconstruit par microtomographie aux rayons X. ....	198
Figure B-3 : Volume de feutre A4 reconstruit par microtomographie aux rayons X. ....	198
Figure B-4 : Volume de feutre B1 reconstruit par microtomographie aux rayons X.....	199
Figure B-5 : Volume de feutre B2 reconstruit par microtomographie aux rayons X.....	200

---

**Annexe C : Rhéologie des feutres.**

Figure C-1: Évolution de la porosité du feutre A1 pendant sa compression.....	201
Figure C-2: Évolution de la porosité du feutre A2 pendant sa compression.....	201
Figure C-3: Évolution de la porosité du feutre A3 pendant sa compression.....	202
Figure C-4: Évolution de la porosité du feutre A4 pendant sa compression.....	202
Figure C-5: Évolution de la porosité du feutre A221 pendant sa compression.....	203
Figure C-6: Évolution de la porosité du feutre A249 pendant sa compression.....	203
Figure C-7: Évolution de la porosité du feutre B1 pendant sa compression.....	204
Figure C-8: Évolution de la porosité du feutre B2 pendant sa compression.....	204

**Annexe D : Résultats des mesures de porosimétrie au mercure.**

Figure D-1 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre A1. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations. ....	205
Figure D-2 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre A2. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations. ....	205
Figure D-3 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre A3. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations. ....	206
Figure D-4 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre A4. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations. ....	206
Figure D-5 : Résultats des mesures porosimétriques sur le feutre B1. Les courbes continues représentent la distribution des diamètres hydrauliques du feutre. Les courbes en pointillés représentent les distributions des diamètres hydrauliques du feutre pour des niveaux de déformations. ....	207