

50 376  
1 977  
128-1

N° d'Ordre : 205

50376  
1977  
128-1

# THESE

PRESENTEE A LA

FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE LILLE

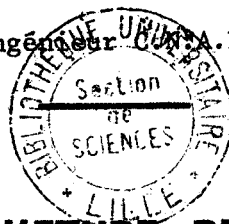
POUR L'OBTENTION DU TITRE DE

DOCTEUR INGENIEUR

par

**Emmanuel BONTE**

Ingénieur C. A. M.



**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA CIRCULATION  
DES BAINS DE BLANCHIMENT ET DE TEINTURE  
DANS LES EMPAQUETAGES TEXTILES**

Soutenu le 27 juin 1977 devant la Commission d'Examen

M. J.M. LEROY	Président
Mme M. EVRARD	} Examineurs
M. F. PETIT	
M. G. MAZINGUE	Membre invité

A la Mémoire de ma Mère  
qui m'a légué le goût du travail,

A mon Epouse, pour ses sacrifices,  
son aide et sa compréhension,

A ma fille Sylvie,  
pour son dévouement,

A mes enfants  
Gilles et Cécile

Ce travail a été réalisé sous la Direction de Madame le Professeur M. EVRARD, Chef du Département Chimie de l'I.U.T. de Lille I. Je suis heureux de lui exprimer ici ma respectueuse reconnaissance.

Monsieur le Professeur J.M. LEROY, Directeur des Etudes à l'E.N.S.C.L. et Professeur de Chimie Industrielle au Centre associé de Lille au C.N.A.M., me fait l'honneur de présider cette thèse ; qu'il veuille croire à ma profonde gratitude.

Monsieur F. PETIT, Maître de Conférences, Adjoint au Chef du Département Chimie de l'I.U.T., s'est toujours très intéressé à l'évolution de mes recherches et m'a aidé de ses conseils et de ses encouragements ; je l'en remercie très vivement.

Je suis reconnaissant à Monsieur G. MAZINGUE, Directeur de l'Institut Textile de France (Section Nord) d'avoir accepté que le présent travail soit réalisé au sein de l'Institut. Sa présence dans ce Jury est une preuve de l'encouragement qu'il ne cesse d'apporter à ses collaborateurs.

Je remercie aussi tous les membres de l'Industrie qui m'ont apporté leur concours, ainsi que les collègues qui m'ont aidé dans le déroulement de ces recherches et en particulier P. DE BACKER pour la réalisation d'une partie du dispositif expérimental.

## R E S U M E

-----

Pour essayer de mieux comprendre l'écoulement des fluides à travers les emballages textiles, on a envisagé plusieurs cas de complexité croissante : bourre de fibres de verre ; bourre de fibres de polyester, bourre de fibres de lin ; bobine de mèche de lin.

Quelques modèles théoriques ont d'abord été recherchés et définis, parmi lesquels : la relation de KOZENY-CARMAN déduite de l'équation de POISEUILLE, qui régit l'écoulement laminaire dans les milieux poreux, et dans laquelle le terme vitesse (ou débit) intervient au degré 1 ; une expression plus générale déduite de la relation de FANNING et dans laquelle le débit intervient au degré 2 ; une relation mixte basée sur les 2 précédentes.

Dans les différents cas expérimentaux, on a utilisé le même dispositif qui comprend essentiellement : une cuve de réserve avec régulation, une pompe centrifuge qui assure la circulation du fluide, un récipient contenant l'emballage fibreux et des dispositifs de contrôle.

Sur bourre de fibres de verre, on a réalisé des circulations de fluides à 5 viscosités (eau et mélanges eau-glycérol) à travers des tampons à 8 porosités (de  $\epsilon = 0,84$  à  $\epsilon = 0,98$ ). Le débit volumique et la perte de charge ont toujours été mesurés au cours du temps, et on en a déterminé la valeur de la perméabilité du tampon fibreux ( $Q_v/\Delta p$ ). On a recherché le domaine de validité de la relation de KOZENY-CARMAN et constaté que celle-ci est bien applicable lorsque les nombres de Reynolds sont petits. Selon les cas, les nombres de Reynolds critiques se sont situés entre 1 et 10 environ. Au-delà de ces valeurs, la perméabilité observée est bien inférieure à celle qui résulte de l'application du modèle de KOZENY et il n'a pas été possible de trouver un autre modèle valable pour toutes les porosités et viscosités expérimentées. Lorsque l'équation de KOZENY est applicable, la constante ( $h_K$ ) est de l'ordre de 6,0.

Sur bourre de polyester, on a réalisé des circulations d'eau à 3 viscosités (1,0 à 0,35 cPo), à travers des tampons à 8 porosités. En raison de la souplesse des fibres, il a été possible

d'obtenir des porosités plus faibles que précédemment ( $\epsilon = 0,66$  à  $\epsilon = 0,94$ ). On n'a pas constaté de variation de perméabilité consécutive à un éventuel gonflement des fibres. Comme pour les tampons de fibres de verre, la relation de KOZENY est bien applicable lorsque les nombres de Reynolds sont petits (1 à 9 selon les cas). Au-delà de ces valeurs, la perméabilité réelle est inférieure à la perméabilité théorique (KOZENY) et il n'a pas été possible d'appliquer l'un des 2 autres modèles. La constante de KOZENY a été trouvée un peu plus faible que dans le cas de la fibre de verre (5,6 à 5,7).

Puis, on a étudié le cas du lin beaucoup plus complexe, d'une part parce que les éléments fibreux sont irréguliers et très difficiles à définir, d'autre part, parce qu'ils gonflent en milieu aqueux. Deux sortes de matières ont été expérimentées, l'une normalement rouie de 1975, l'autre incomplètement rouie de 1976. Il a d'abord fallu déterminer avec la meilleure exactitude, la masse volumique et la surface spécifique des éléments fibreux ; cela a été possible, par perméamétrie gazeuse en régime laminaire.

On a alors réalisé des circulations d'eau à 20°C à travers 7 types de tampons fibreux de porosités initiales (état sec) se situant entre 0,67 et 0,86. La perméabilité décroît au cours du temps pour devenir à peu près constante après 60 minutes de circulation ; il apparaît que l'évolution de cette perméabilité est surtout importante en début de circulation ; elle serait excessive entre les temps 0 et 5 minutes. On a tenté de déterminer le taux de gonflement de l'élément fibreux de lin, par des mesures de perméabilité. Pour des nombres de Reynolds petits ( $\leq 1$ ) c'est-à-dire lorsque l'écoulement est supposé laminaire, les valeurs de gonflement sont assez constantes et de l'ordre de 2, tant pour une matière que pour l'autre. Lorsque le fluide de circulation est une solution de carbonate à 20 g/l, la perméabilité est peu réduite par rapport à ce qu'elle est avec de l'eau à la même température. Par contre en solution de soude même peu concentrée (2 g/l), la réduction de perméabilité (par rapport à l'eau) est très importante pour la matière 1976 et beaucoup plus modérée pour la matière 1975.

Mais le lin a également été expérimenté à l'état de mèche de banc-à-broches présentée sur bobinot en polypropylène. Dans ce cas l'évolution de la perméabilité au cours du temps est différente de celle que l'on constate à l'état de bourre, car deux phénomènes importants interviennent ; le gonflement de l'élément fibreux qui fait

décroître la perméabilité ; la réduction de section de la mèche qui favorise le passage entre spires et augmente la perméabilité globale. On a confirmé le gonflement important de la matière 1976 en milieu sodique et exclu ce réactif dans les traitements industriels du lin de la dernière récolte.

La connaissance de la dissociation fibreuse résultant du traitement chimique est capitale et le taux de dissociation propre à un filage convenable doit être maintenu dans un intervalle précis. Le lin de 1976 étant particulièrement sensible à l'action de l'alcali, nous avons étudié et défini un traitement qui, appliqué industriellement, permet de limiter la dissociation tout en réduisant l'énergie calorifique nécessaire.

Pour terminer, on a imaginé une méthode de mesure de la vitesse d'un liquide dans un emballage fibreux et réalisé le dispositif nécessaire à cette détermination. Il s'agit là d'un renseignement dont on ne disposait pas jusqu'alors et grâce auquel on pourrait envisager de déterminer la porosité de l'emballage textile dans les conditions mêmes du traitement (pH, température) ; ceci est particulièrement intéressant pour les fibres qui gonflent notablement en milieu aqueux.

# S O M M A I R E

---

	<u>Page</u>
Introduction	1
Chapitre I - RECHERCHE D'UN MODELE THEORIQUE	2
1-1 - Forme quadratique de la loi d'écoulement	2
1-2 - Relation entre perméabilité et porosité Expression de KOZENY-CARMAN	3
1-3 - A propos de la constante de KOZENY et de la tortuosité	6
1-4 - Autres modèles d'expression de la perte de charge	8
Chapitre II - ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ECOULEMENT A TRAVERS UN TAMPON FIBREUX INERTE.	11
2-1 - Objet du travail	11
2-2 - Montage expérimental	12
2-3 - Cellule de mesure	14
2-4 - Causes des variations de $Q_v$ et $\Delta p$ au cours du temps	15
2-5 - Dispersion entre répétitions	16
2-6 - Circulation d'eau avec mouillant. Evolution de $Q_v$ et $\Delta p$ au cours du temps	16
2-7 - Perméabilité ( $Q_v/\Delta p$ ) du tampon fibreux seul	19
2-8 - Courbes caractéristiques du circuit	20
2-9 - Conditions expérimentales	22
2-10- Détermination du nombre de Reynolds	23
2-11- Influence de la porosité. Vérification de la vali- dité de la relation de KOZENY-CARMAN	23
2-12- Influence de la porosité. Vérification de la rela- tion générale pour milieu poreux.	31
2-13- Influence de la viscosité du bain. Validité de la relation de KOZENY-CARMAN	34
2-14- Essai d'application de la relation mixte	34
Chapitre III - ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ECOULEMENT A TRAVERS UN TAMPON DE FIBRES DE POLYESTER	39
3-1 - Installation expérimentale et échantillonnage	39
3-2 - Conditions expérimentales	40
3-3 - Evolution de $Q_v$ et $\Delta p$ au cours du temps	41

	<u>Page</u>
3-4 - Domaine de validité de la relation de KOZENY	43
3-5 - Influence de la viscosité du bain	46
3-6 - Essai d'application de la relation mixte	46
Chapitre IV - ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ECOULEMENT A TRAVERS UN TAMPON DE FIBRES DE LIN.	50
4-1 - Installation expérimentale et échantillonnage	50
4-2 - Structure fibreuse particulière du lin	51
4-3 - Détermination de la surface spécifique moyenne de l'élément fibreux de lin	53
4-4 - Influence de la porosité. Vérification de la vali- dité de la relation de KOZENY-CARMAN	65
4-5 - Evolution de la perte de charge en fonction du débit. Domaine de validité de la loi de Darcy	65
4-6 - Détermination de la perméabilité à l'eau de dif- férents tampons fibreux. Evolution au cours du temps	69
4-7 - Facteurs conditionnant la perméabilité d'un tampon fibreux de lin	73
4-8 - Perméabilité aux solutions de carbonate, de diffé- rents tampons fibreux. Evolution au cours du temps	75
4-9 - Perméabilité à différentes solutions alcalines et à différentes températures	81
4-10- Estimation du gonflement de la fibre de lin au cours d'un traitement aqueux	86
4-11- Détermination du nombre de Reynolds en milieu fi- breux gonflé, dans les conditions de circulation.	91
Chapitre V - ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CIRCULATION RADIALE DU BAIN, A TRAVERS LES BOBINES DE MECHE DE LIN	94
5-1 - Installation expérimentale	94
5-2 - Présentation de la matière textile	95
5-3 - Perméabilité à l'eau de bobines de mèche (8 x 4 pouces). Influence de la température	96
5-4 - Perméabilité de bobines de mèche (10 x 5 1/2 pouces) Influence de la matière et de l'alcali utilisé	103
5-5 - Influence de la température du bain sur la perméabi- lité de bobines de mèche et sur la dissociation fi- breuse	108
5-6 - Influence du débit sur l'efficacité du traitement de blanchiment. Cas de la mèche de lin.	114



	<u>Page</u>
Chapitre VI - MESURE DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT DU FLUIDE DANS UN EMPAQUETAGE TEXTILE	120
6-1 - Principe de la mesure	120
6-2 - Dispositif de mesure	121
6-3 - Exploitation du diagramme	123
6-4 - Estimation de la section des interstices et de la porosité	124
CONCLUSION	127
NOTATIONS	129
BIBLIOGRAPHIE	131
ANNEXES	
Annexe 1 - Etablissement d'une relation générale d'écou- lement en milieu poreux, donnant $Q_v$ et $\Delta p$ en fonction de la porosité	A 1
Annexe 2 - Calcul du nombre de Reynolds en milieu poreux fibreuse	A 3
Annexe 3 - Détermination de la viscosité de différents bains utilisés en blanchiment et en teinture	A 4
Annexe 4 - Théorie d'une détermination perméamétrique de la finesse moyenne des éléments fibreux de lin	A11
Annexe 5 - Détermination du taux de gonflement de l'élé- ment fibreux par la variation de perméabilité	A14
Annexe 6 - Calcul de la porosité d'un fil ou d'une mèche connaissant son titre et son diamètre	A16

Chapitre VI - MESURE DE LA VITESSE D'ECOULEMENT DU FLUIDE DANS UN EMPAQUETAGE TEXTILE	120
6-1 - Principe de la mesure	120
6-2 - Dispositif de mesure	121
6-3 - Exploitation du diagramme	123
6-4 - Estimation de la section des interstices et de la porosité	124
CONCLUSION	127
NOTATIONS	129
BIBLIOGRAPHIE	131
ANNEXES	
Annexe 1 - Etablissement d'une relation générale d'écou- lement en milieu poreux, donnant $Q_v$ et $\Delta p$ en fonction de la porosité	A 1
Annexe 2 - Calcul du nombre de Reynolds en milieu poreux fibreuse	A 3
Annexe 3 - Détermination de la viscosité de différents bains utilisés en blanchiment et en teinture	A 4
Annexe 4 - Théorie d'une détermination perméamétrique de la finesse moyenne des éléments fibreux de lin	A11
Annexe 5 - Détermination du taux de gonflement de l'élé- ment fibreux par la variation de perméabilité	A14
Annexe 6 - Calcul de la porosité d'un fil ou d'une mèche connaissant son titre et son diamètre	A16

## INTRODUCTION

Les traitements de blanchiment et teinture de fibres, fils et même tissus, sont souvent réalisés par circulation de bain. Or, si de nombreux travaux ont été entrepris pour étudier le caractère chimique des traitements et proposer des recettes applicables à telle ou telle fibre, il apparaît que l'aspect physique de la circulation des bains à travers les emballages textiles, n'a été abordé que par un nombre très limité de chercheurs.

Pour introduire et développer la notion de teinture rapide en plein bain, DAUTRICOURT (1) a mis l'accent sur l'importance du débit volumique et proposé à cette fin, soit l'utilisation de pompes puissantes, soit une augmentation de la porosité de la masse fibreuse, soit une réduction de la viscosité du bain. CARBONELL et ses collaborateurs (2) ont souligné la nécessité de considérer essentiellement la fréquence de circulation dans l'étude de l'épuisement d'un colorant. Plus récemment, KRETSCHMER (3) a proposé une relation donnant la perte de charge en fonction de la vitesse d'écoulement et d'un certain nombre de caractéristiques propres à l'emballage textile. Contrairement aux idées de DAUTRICOURT, il considère que l'efficacité et la régularité du traitement ne sont pas forcément liées au débit volumique du bain. Toutefois, on ne trouve dans son travail, aucune vérification expérimentale de la validité et du domaine d'application de son modèle. C'est la raison pour laquelle, il nous a paru souhaitable d'apporter une contribution supplémentaire à l'étude de la circulation des bains, dans les procédés d'ennoblissement textile.

Nous rechercherons d'abord parmi les lois de la mécanique des fluides, les théories les plus aptes à être appliquées.

Puis nous essayerons de vérifier leur validité sur des tampons constitués de fibres ne présentant pas d'interaction vis-à-vis du fluide de circulation (pas de modification structurale ni de transfert de matière).

Enfin nous aborderons un cas beaucoup plus complexe, celui de la fibre de lin dont nous étudierons le comportement en milieu alcalin.

Chapitre I

RECHERCHE D'UN MODELE THEORIQUE

Il est exclu de s'attarder ici sur des considérations générales de la mécanique des fluides traitant de l'écoulement dans les conduites. Seul le milieu poreux retiendra notre attention.

Une étude bibliographique complète devrait commencer par évoquer les lois de base de la perméamétrie et en particulier les travaux de DARCY, POISEUILLE, SPERRY, KOZENY, CARMAN... Les relations établies par ces auteurs sont devenues classiques et il ne paraît pas utile d'alourdir le présent rapport en les citant toutes. A ce sujet, un examen bibliographique remarquable a été publié par BEN AÏM (4).

1-1 - FORME QUADRATIQUE DE LA LOI D'ECOULEMENT.  
=====

Depuis que DARCY (5) a établi la proportionnalité entre le débit et la perte de charge dans un milieu poreux, on est bien obligé d'admettre que beaucoup d'expérimentateurs n'ont pas retrouvé la forme linéaire. Un grand nombre d'auteurs citent une relation dans laquelle le débit (ou éventuellement la vitesse) intervient à la fois au degré un et au degré deux. D'autres proposent un exposant fractionnaire, par exemple :

$$J = a \cdot u^{3/2} + b \cdot u^2 \quad (1)$$

cité par FORCHHEIMER et HOUPEURT (6)

On trouve même parfois, dans la bibliographie, une tendance opposée, c'est-à-dire une courbe à concavité vers le bas.

Le domaine de validité de la loi de DARCY a été précisé par FANCHER (7) qui établit que la proportionnalité entre le débit et la perte de charge n'est réelle que lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à l'unité, c'est-à-dire dans certaines conditions d'écoulement laminaire et en particulier :

- lorsque la résistance à l'écoulement est uniquement due aux forces de viscosité (écoulement laminaire de STOKES) ;
- lorsque le fluide demeure inerte vis-à-vis du milieu poreux, c'est-à-dire lorsque des effets chimiques, électriques, d'adsorption ou de capillarité n'existent pas.

L'apparition du terme carré dans la relation donnant la perte de charge en fonction de la vitesse, s'expliquerait par une dégradation de l'énergie cinétique au sein du tampon fibreux, qui proviendrait des perpétuelles variations de la vitesse réelle, dues aux inégalités de dimensions transversales des canaux.

Récemment CHAVETEAU (8) a montré que l'écoulement de liquides dans des canaux de section droite périodiquement variable pouvait conserver le caractère laminaire tout en donnant lieu à une loi quadratique de perte de charge en fonction de la vitesse d'écoulement.

#### 1-2 - RELATION ENTRE PERMEABILITE ET POROSITE.

##### =====

##### EXPRESSION DE KOZENY-CARMAN.

##### =====

SLICHTER fut l'un des premiers à essayer d'établir une relation entre la porosité et la perméabilité et ses travaux ont été entrepris à partir d'un assemblage rhomboédrique de sphères d'égal diamètre. Par la suite, bien des chercheurs ont abordé ce problème, mais souvent, ils ont travaillé sur des modèles d'assemblages bien particuliers de sorte que leurs formules étaient difficilement généralisables.

KOZENY a proposé vers 1927, une relation plus générale, reliant la perméabilité à certaines propriétés globales du milieu et notamment la porosité ( $\epsilon$ ) et la surface spécifique des particules ( $\sigma$ ).

Ses travaux ont été poursuivis et approfondis par plusieurs chercheurs et en particulier CARMAN qui, partant de l'équation de HAGEN-POISEUILLE réétablit vers 1939, la relation de KOZENY, en l'explicitant davantage (9). Plus récemment, WYLLIE et GARDNER apportèrent une nouvelle contribution aux problèmes d'écoulement des fluides et proposèrent une généralisation de l'équation de KOZENY-CARMAN (10).

La forme de KOZENY-CARMAN s'écrit sous forme différentielle :

$$\frac{dp}{dL} = \frac{h_K \cdot \eta \cdot v \cdot \sigma^2 \cdot (1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \quad (2)$$

Après intégration, on obtient, pour un milieu filtrant cylindrique traversé parallèlement à son axe (voir Fig. 1) :

$$\frac{Q_v}{\Delta p} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{S}{L} \cdot \frac{\epsilon^3}{h_K \cdot \sigma^2 \cdot (1 - \epsilon)^2} \quad (3)$$

$Q_v$  étant le débit volumique,  
 $\Delta p$  la perte de charge,  
 $\eta$  la viscosité dynamique du fluide,  
 $S$  la section droite perpendiculaire au sens du courant,  
 $L$  la longueur traversée,  
 $\epsilon$  la porosité du tampon fibreux,  
 $\sigma$  la surface spécifique des particules (ou des fibres)

Dans le cas d'une circulation radiale (voir Fig. 2), l'intégration de la relation (2) conduit à :

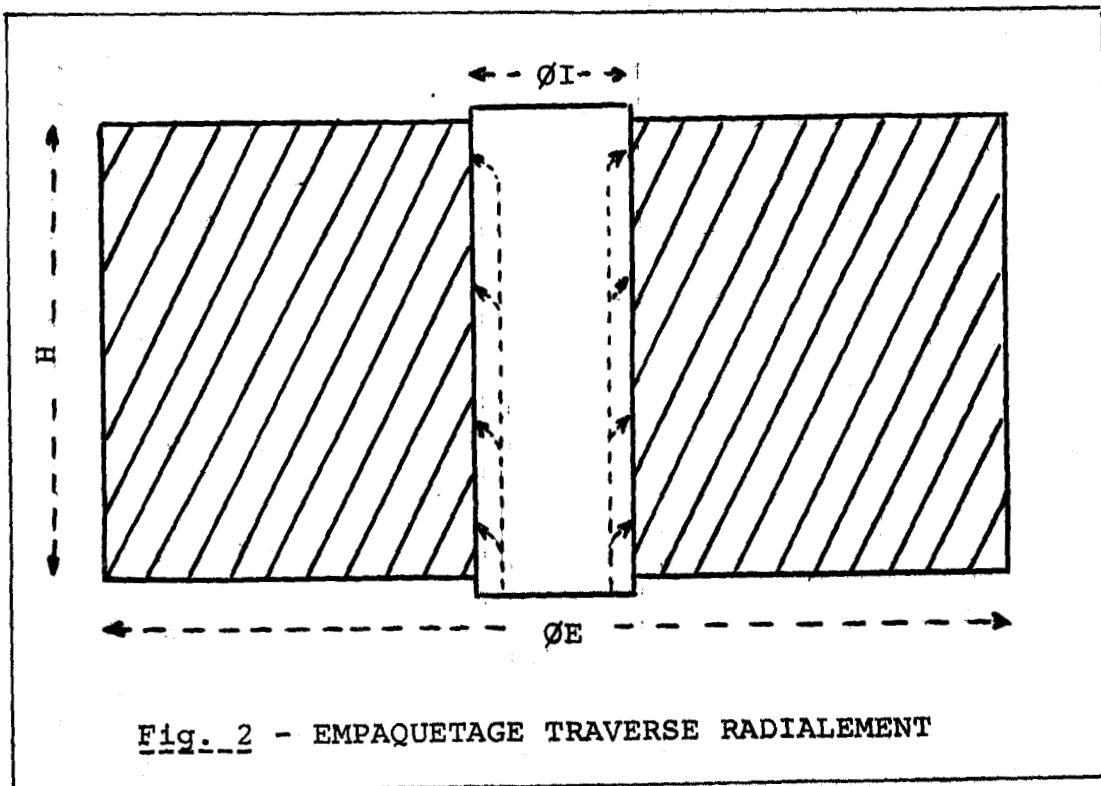
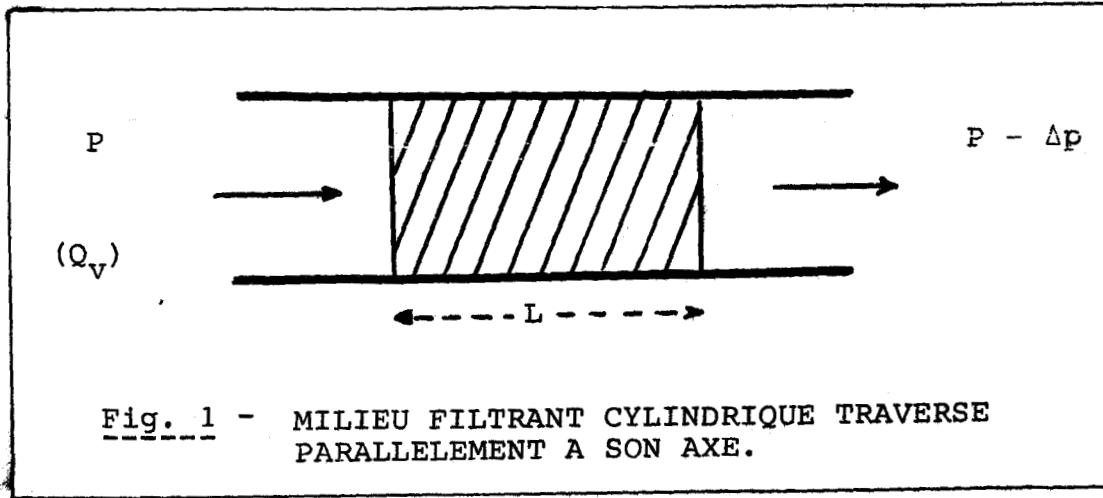
$$\frac{Q_v}{\Delta p} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{2 \pi \cdot H}{\text{Log} \frac{\emptyset E}{\emptyset I}} \cdot \frac{\epsilon^3}{h_K \cdot \sigma^2 \cdot (1 - \epsilon)^2} \quad (4)$$

$H$  étant la hauteur de l'empaquetage fibreux,  
 $\emptyset E$  et  $\emptyset I$ , respectivement ses diamètres extérieur et intérieur.

$$\text{L'expression } K_t = \frac{Q_v}{\Delta p} \quad (5)$$

traduit la perméabilité totale de la masse fibreuse

$$\text{tandis que son inverse : } R_t = \frac{\Delta p}{Q_v} \quad (6)$$



est la résistance totale opposée par le tampon fibreux au passage du fluide.

Remarques.

- 1) Comme l'équation de POISEUILLE dont elle découle, la relation de KOZENY-CARMAN n'est applicable qu'en régime laminaire, ce dernier étant d'ailleurs plus difficile à préciser en milieu poreux qu'en conduite cylindrique. (On consultera en Annexe 2 le mode de détermination du nombre de Reynolds, dans le cas d'une bourre fibreuse).
- 2) Le passage de la loi de POISEUILLE (écoulement en tubes capillaires) à la relation de CARMAN (écoulement en milieu poreux), oblige à poser un certain nombre d'hypothèses, notamment en ce qui concerne la texture du milieu, la forme et l'assemblage des particules. Les hydrodynamiciens qui ont étudié cette question ont été amenés à introduire 2 paramètres supplémentaires : la tortuosité (T) des interstices et un facteur de non-circularité des interstices ( $\gamma$ ). La constante ( $h_K$ ) tient compte de ces 2 paramètres (voir Annexe 1)
- 3) Même en supposant vérifiées les hypothèses posées, l'application de la relation de KOZENY est limitée au milieu poreux homogène, par exemple une bourre dont les fibres sont très régulièrement réparties : il n'y a alors qu'un seul type d'interstices : entre fibres. Dans le cas de la mèche ou du fil, le problème est plus complexe car il y a alors deux types d'interstices : entre spires (de mèche ou de fil) dans la bobine et entre fibres dans chaque spire.

1-3 - A PROPOS DE LA CONSTANTE DE KOZENY ET DE LA TORTUOSITE.  
=====

A l'annexe 1, nous avons défini comme suit, la constante de KOZENY :

$$h_K = 2 \gamma \cdot T^2 \quad (7)$$

$\gamma$  étant le facteur de "non circularité" des interstices, pratiquement compris entre 1,0 et 1,3 (11) ;

T étant la tortuosité ou rapport de la longueur moyenne des interstices à la longueur (ou épaisseur) du tampon fibreux.



Il est connu (12) que pour des porosités faibles ou tout au moins inférieures à 0,7,  $h_K$  est assez constant et de l'ordre de 4,5.

Lorsque la porosité est plus élevée, l'application du modèle de KOZENY aux résultats expérimentaux, conduit à considérer que  $h_K$  augmente avec la porosité. Pour des tampons de fibres de soie non ordonnées, LE GOFF (12) fournit les valeurs ci-après :

$h_K$	=	5,2	pour	$\epsilon$	=	0,77
"	=	8,8	"	"	=	0,94
"	=	13,8	"	"	=	0,977
"	=	22,0	"	"	=	0,989

Si l'on s'en réfère à la relation (7) il faudrait donc admettre que  $T$  augmente ; or ceci est paradoxal, car pour des porosités proches de 1, le chemin des filets fluides doit être plus court et la tortuosité voisine de 1 (c'est-à-dire plus faible).

Pour des porosités non éloignées de 1, ce qui dans la majorité des cas, entraîne une vitesse de fluide relativement élevée, il paraît donc plus raisonnable d'admettre qu'on s'écarte notablement du régime laminaire, qu'il y a dégradation partielle de l'énergie cinétique du fluide, que le modèle de KOZENY n'est plus applicable et qu'il faut faire appel à des relations telles que celles proposées ci-après au § 1-4.

Quoi qu'il en soit, il est bon de rappeler avec LE LEC (11) que le concept de tortuosité doit être considéré comme une image introduite pour définir un modèle, mais que dans bon nombre de cas, et en particulier lorsqu'il s'agit de fibres, bien d'autres facteurs pas toujours mesurables interviennent, de sorte qu'une "variation limitée" de la "constante" de KOZENY, selon les milieux, peut très bien se concevoir, même en écoulement laminaire. Pour de très nombreux milieux granulaires et dans le domaine d'application de la relation de KOZENY, LE GOFF (12) propose :

$$h_K = 4,5 \pm 1 \quad (8)$$

1-4 - AUTRES MODES D'EXPRESSION DE LA PERTE DE CHARGE.  
=====

Lorsque le régime n'est pas typiquement laminaire, il faut avoir recours à des formules plus générales valables quel que soit le régime d'écoulement.

1) La relation générale de FANNING

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot \bar{V}^2 \cdot L}{2 D} \quad (9)$$

habituellement utilisée pour l'étude de l'écoulement en conduite cylindrique, peut être transposée au milieu poreux (voir annexe 1).

On obtient alors :

$$\frac{Q_V^2}{\Delta p} = \frac{S^2}{L} \cdot \frac{\varepsilon^3}{k_1 \cdot \rho \cdot \sigma (1 - \varepsilon)} \quad (10)$$

le débit volumique étant exprimé au degré 2.

$k_1$  dépendant du coefficient de perte de charge  $\lambda$  (voir annexe 1) peut être considéré comme constant en régime franchement turbulent.

2) Lorsqu'on établit la relation de KOZENY à partir de celle de POISEUILLE, on considère généralement le milieu poreux comme un assemblage de capillaires et le concept de tortuosité est alors illustré par un schéma tel que celui représenté en Fig. 3, avec

$$T = \frac{L'}{L}$$

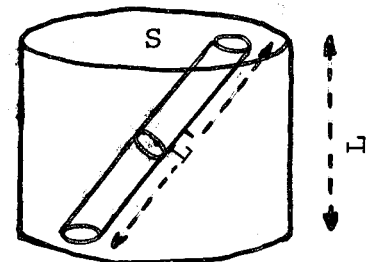


Fig. 3

En réalité, dans le milieu poreux il doit exister de nombreux coudes, chacun d'eux étant le siège d'un remous dans lequel une certaine fraction de l'énergie cinétique du fluide est transformée en chaleur. La Fig. 4 représente un modèle d'interstices en "Zig-Zag" dans un milieu poreux.

1-4 - AUTRES MODES D'EXPRESSION DE LA PERTE DE CHARGE.  
=====

Lorsque le régime n'est pas typiquement laminaire, il faut avoir recours à des formules plus générales valables quel que soit le régime d'écoulement.

1) La relation générale de FANNING

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot \bar{v}^2 \cdot L}{2 D} \quad (9)$$

habituellement utilisée pour l'étude de l'écoulement en conduite cylindrique, peut être transposée au milieu poreux (voir annexe 1).

On obtient alors :

$$\frac{Q_v^2}{\Delta p} = \frac{S^2}{L} \cdot \frac{\epsilon^3}{k_1 \cdot \rho \cdot \sigma (1 - \epsilon)} \quad (10)$$

le débit volumique étant exprimé au degré 2.

$k_1$  dépendant du coefficient de perte de charge  $\lambda$  (voir annexe 1) peut être considéré comme constant en régime franchement turbulent.

2) Lorsqu'on établit la relation de KOZENY à partir de celle de POISEUILLE, on considère généralement le milieu poreux comme un assemblage de capillaires et le concept de tortuosité est alors illustré par un schéma tel que celui représenté en Fig. 3, avec

$$T = \frac{L'}{L}$$

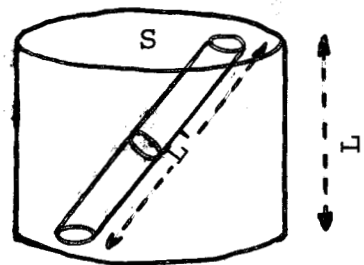


Fig. 3

En réalité, dans le milieu poreux il doit exister de nombreux coudes, chacun d'eux étant le siège d'un remous dans lequel une certaine fraction de l'énergie cinétique du fluide est transformée en chaleur. La Fig. 4 représente un modèle d'interstices en "Zig-Zag" dans un milieu poreux.

En plus de la chute de pression par glissement visqueux sur les parois des pores, représentée par l'équation de KOZENY-CARMAN, il existe donc une seconde chute de pression que l'on peut exprimer comme une fraction de l'énergie cinétique du fluide.

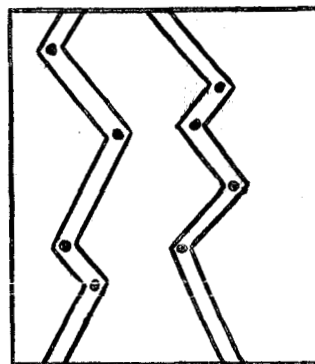


Fig. 4

Il paraît donc logique, pour exprimer la perte de charge totale, d'allier les relations (3) et (10), ou plus exactement les relations (a9) et (a7), la première représentant l'écoulement visqueux et la seconde la "dégradation" de l'énergie. On aurait ainsi :

$$\Delta p = \eta \cdot Q_v \frac{L}{S} \cdot \frac{h_K \cdot \sigma^2 (1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} + k_2 \cdot Q_v^2 \frac{L}{S^2} \cdot \frac{\rho \cdot \sigma \cdot (1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \quad (11)$$

Dans la seconde partie de cette expression, on a introduit une constante  $k_2$  qui serait inférieure à la constante  $k_1$  de la relation (10) puisque une partie seulement de l'énergie cinétique du fluide se trouve dégradée dans le remous.

Nous avons pensé à allier les deux expressions de la perte de charge car la relation (11) ainsi obtenue est absolument similaire à l'équation d'ERGUN (12) qui traduit  $\Delta p$  en fonction de la vitesse moyenne.

- 3) CLARENBURG et PIEKAAR (13) ont proposé un modèle statistique pour l'étude de l'écoulement en milieu poreux fibreux ; mais son application par LE LEC (11) à une cellule de filtration constituée de fibres de nylon n'a pas fourni satisfaction.
- 4) Enfin, il est nécessaire de citer les travaux de KYAN (14). Cet auteur a imaginé que les pertes de charge relativement importantes constatées dans les tampons fibreux, pouvait être dues, d'une part à la présence de volumes morts importants au croisement des fibres, ne participant pas à l'écoulement, d'autre part, à l'existence de trois types de perte d'énergie :

- une chute de pression visqueuse ;

- un terme correspondant à la traînée du fluide s'écoulant autour des fibres.
- un terme correspondant à la flexion des fibres sous l'action de ces forces de traînée.

Toutefois, il est permis de douter de l'importance et même de l'existence de ce dernier terme.

Chapitre II

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ÉCOULEMENT A TRAVERS  
UN TAMPON FIBREUX INERTE

L'étude de la circulation de bains de blanchiment ou de teinture, à travers les emballages textiles est complexe pour différentes raisons :

- Bien des fibres subissent, au cours du traitement, un gonflement fonction de la température et du pH, d'où il résulte une diminution de la porosité et conséquemment de la perméabilité.
- Certaines fibres et en particulier les fibres cellulosiques naturelles, perdent au cours de traitements de lessivage, une partie de leurs constituants, avec pour effet, une diminution de la masse totale fibreuse et une légère augmentation de la viscosité du bain.
- Au cours du temps, la texture de l'emballage fibreux peut évoluer (modification de la répartition des pores).
- Très souvent et notamment dans le cas du fil et du tissu, on a affaire à plusieurs types d'interstices dont les influences respectives ne sont pas toujours déterminées avec facilité.

C'est la raison pour laquelle l'expérimentation dont les résultats sont présentés ci-après, a porté sur une fibre n'ayant pas d'interaction vis-à-vis du fluide de circulation.

2-1 - OBJET DU TRAVAIL.

=====

Au cours de cette expérimentation, on s'était surtout fixé les objectifs suivants :

- étude en laboratoire, de la circulation d'un liquide, à travers un tampon fibreux inerte (fibres de verre disposées au hasard) ; mesure du débit volumique ( $Q_v$ ) et de la perte de charge ( $\Delta p$ ) entre l'entrée et la sortie du tampon, en fonction de divers paramètres mesurables ;
- influences de la porosité du tampon et de la viscosité du liquide ;
- vérification de la validité des modèles (formule générale et cas particulier du mouvement laminaire) pour plusieurs conditions expérimentales (différents débits, porosités et viscosités) et en fonction du Nombre de Reynolds calculé selon la relation (a 14).

Nous présenterons les différentes parties expérimentales dans leur ordre chronologique qui est en même temps un enchaînement rationnel, et dans chaque cas, nous interpréterons les résultats et ferons le point de l'avancement sur les connaissances acquises.

#### 2-2 - MONTAGE EXPERIMENTAL.

=====

Notre installation de laboratoire (Fig. 5) comprend les dispositifs suivants :

- un réceptacle de réserve (R) d'une contenance d'environ 10 litres, comprenant entre autres un système d'agitation et des dispositifs de mesure et de régulation de température ;
- une pompe centrifuge (P) dont on peut faire varier le débit par l'intermédiaire d'un diaphragme placé en "a" ;
- une cellule de mesure (C) comportant intérieurement un volume utile constant rigoureusement calculé et contenant une masse déterminée de fibres disposées au hasard ;
- un manomètre différentiel (M) permettant de mesurer la perte de charge entre l'amont et l'aval de la cellule C, à la même cote géométrique ;
- un ensemble de tuyauteries reliant les différents organes ;
- un by-pass (BP) permettant de moduler le débit ou de court-circuiter la cellule sans arrêter le fonctionnement de la pompe ;

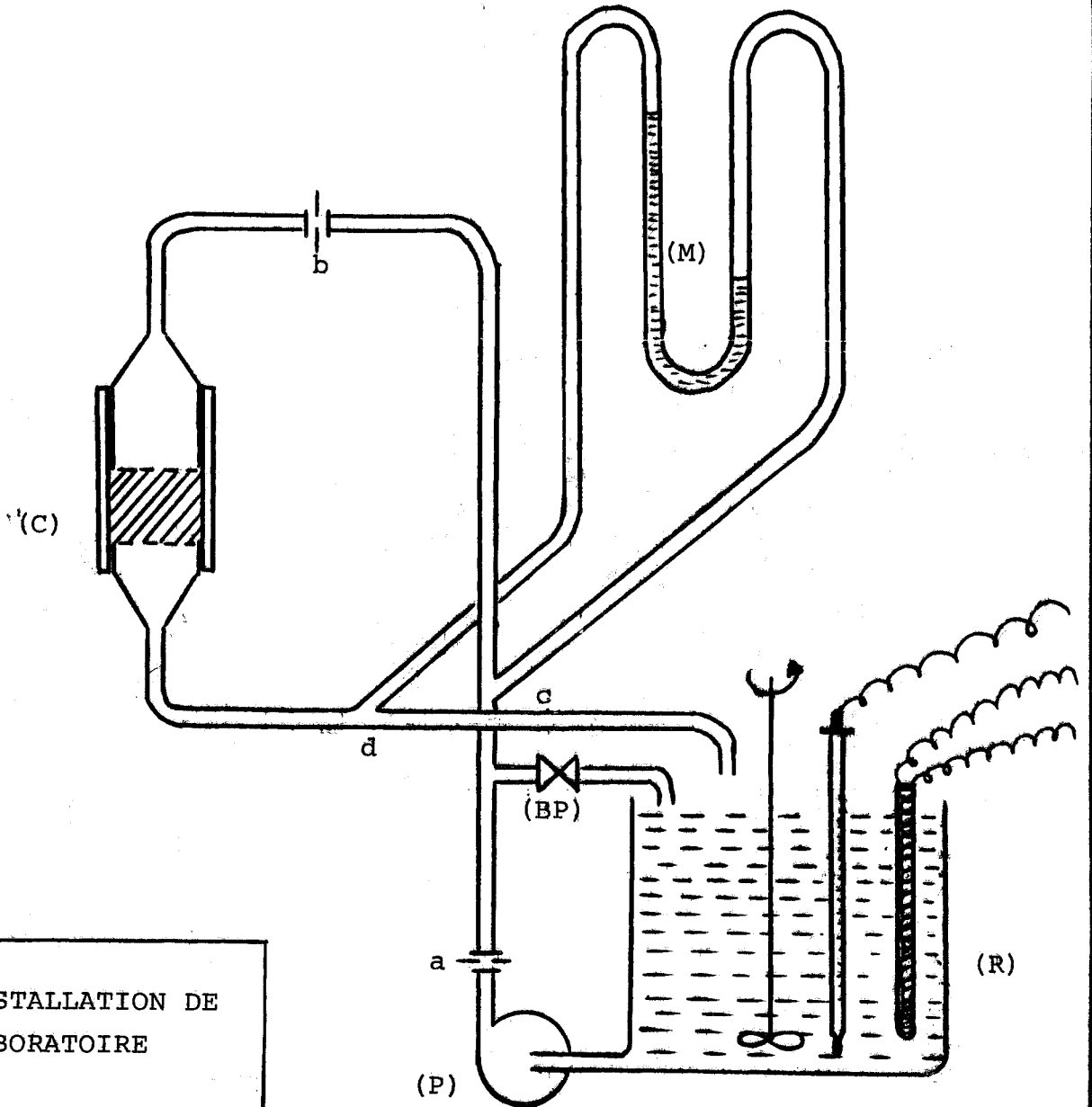


Fig. 5 - INSTALLATION DE LABORATOIRE

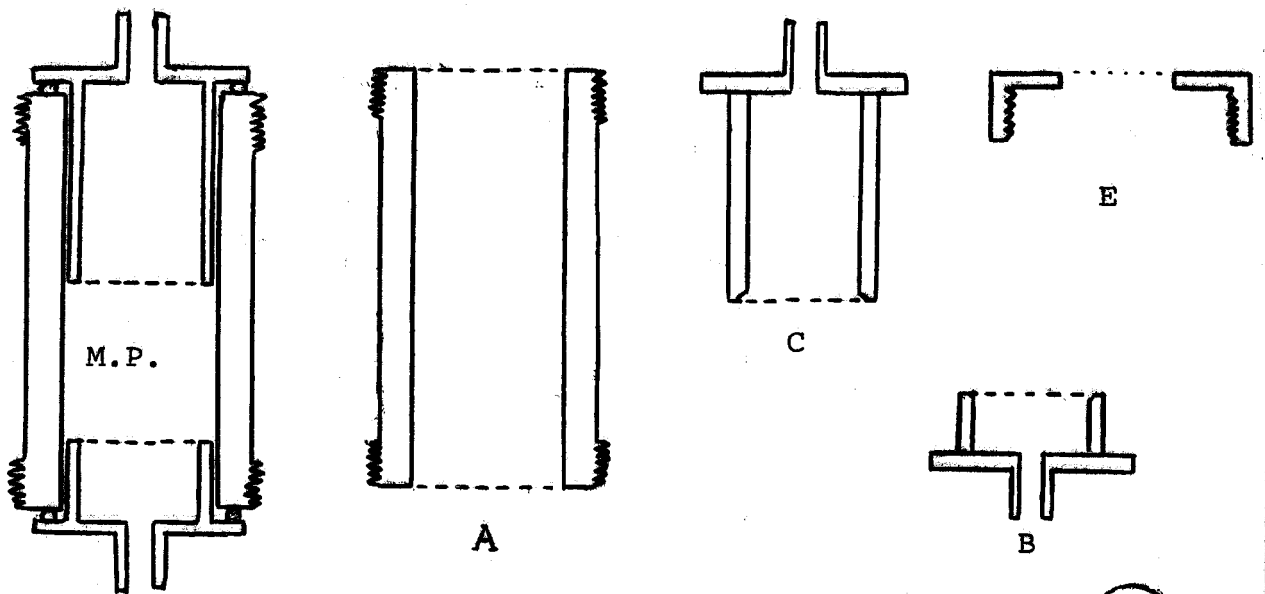


Fig. 6 - CELLULE DE MESURE - PREMIERE REALISATION.





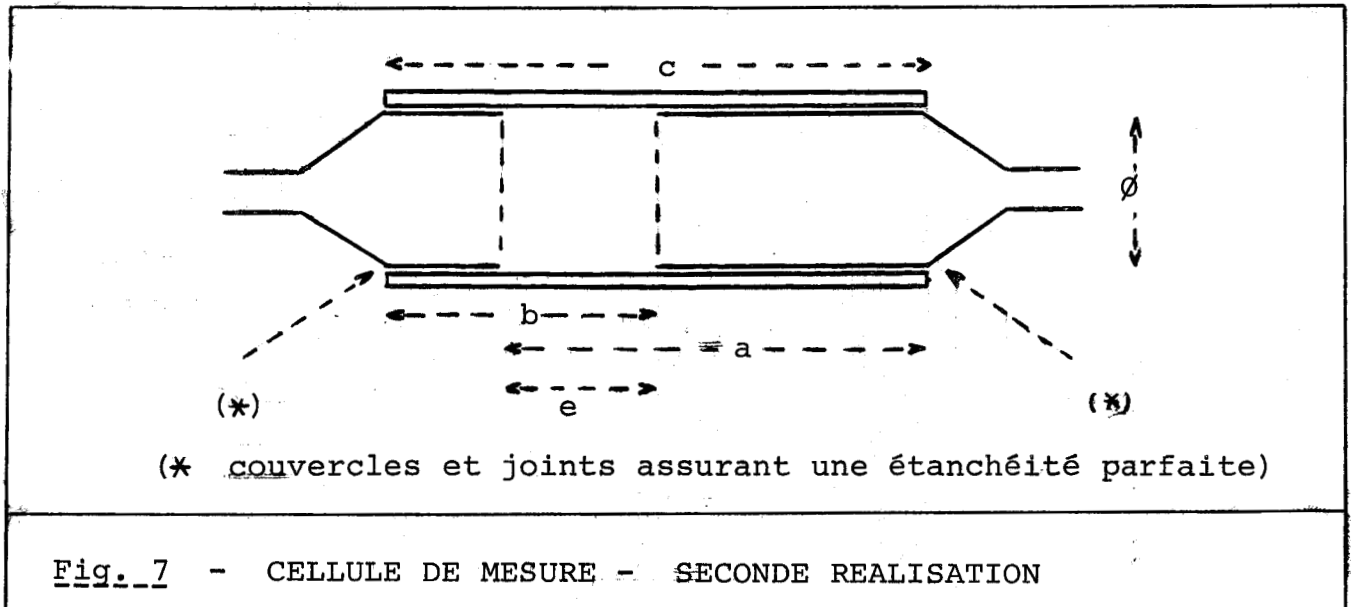
- des diaphragmes placés en "a" et "b" et permettant de modifier le débit ;

2-3 - CELLULE DE MESURE.  
=====

Une première réalisation en polyamide (voir Fig. 6) n'a pas conduit à des résultats probants et a occasionné un certain nombre de difficultés parmi lesquelles :

- instabilité dimensionnelle ;
- déformation partielle du matériau ;
- forme inadaptée des pistons plongeurs, produisant des turbulences et des accumulations de bulles d'air difficilement éliminables.

On a ensuite adopté une cellule en inox, entièrement démontable et dont les pistons plongeurs ont les extrémités coniques de manière à avoir un écoulement plus régulier, et à réduire les risques d'accumulation de bulles d'air (voir Fig. 7).



Les cotes utiles permettant de caractériser les dimensions du tampon fibreux sont :

$$\begin{aligned}\varnothing &= 39,95 \text{ mm} \\ e &= 40,2 \text{ mm}\end{aligned}$$

Pour le tampon fibreux, on a donc :

diamètre :  $\varnothing = 39,95 \text{ mm}$  ou  $3,995 \text{ cm}$   
surface (ou section) :  $S = 12,53 \text{ cm}^2$   
longueur :  $L = 40,2 \text{ mm}$  ou  $4,02 \text{ cm}$   
volume :  $V = 50,4 \text{ cm}^3$

D'autres valeurs utiles sont les suivantes :

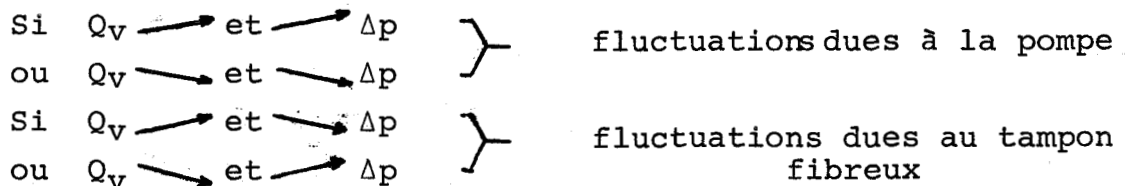
Masse volumique de la fibre :  $\rho_f = 2,5 \text{ g/cm}^3$  (moy. de 5 mes.)  
Diamètre de la fibre :  $d = 7,2 \mu\text{m}$  (moy. de 50 mes.)

2-4 - CAUSES DES VARIATIONS DE  $Q_v$  et  $\Delta p$  AU COURS DU TEMPS.  
=====

Lorsque le débit volumique ( $Q_v$ ) varie au cours du temps, il est important d'en connaître la ou les raisons. Or, cela peut provenir essentiellement de 2 types de fluctuations :

- fluctuations dues à la pompe, par exemple variation du régime ou de la puissance, pour des raisons électriques, mécaniques ou autres...
- fluctuations dues au tampon fibreux : variation de texture ou de dimension ou de porosité.

On peut aisément déterminer l'un ou l'autre de ces 2 types de fluctuations, au moyen des considérations ci-après :



Nous avons ainsi remarqué que nos pompes n'étaient pas parfaitement stables au début de leur temps de fonctionnement mais qu'on parvenait à un état d'équilibre pratiquement invariant au bout d'une demi-heure, ou mieux, 3/4 d'heure. Avant tout travail expérimental de circulation, nous avons donc fait fonctionner nos pompes pendant 3/4 d'heure en circuit by-pass.

2-5 - DISPERSION ENTRE REPETITIONS.

=====

(c'est-à-dire entre les résultats d'éprouvettes de même masse, expérimentées dans les mêmes conditions).

Etant donné qu'il est assez difficile de réaliser manuellement dans la cellule de mesure, une répartition régulière au hasard des fibres, on pouvait s'attendre à ce que les résultats obtenus sur un essai, dans des conditions données, ne soient pas tellement répétitifs.

C'est la raison pour laquelle, nous avons entrepris à 2 températures et pour 3 porosités de tampon fibreux, des mesures de débit volumique ( $Q_v$ ) et de perte de charge ( $\Delta p$ ) sur 3 éprouvettes successives. Dans chaque cas, le calcul du coefficient de variation entre répétitions a conduit aux valeurs présentées au tableau 1.

Dans l'ensemble, les dispersions sont faibles et nettement plus faibles que ce à quoi on pouvait s'attendre. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la mise en place des fibres dans la cellule de mesure, se fait par couches successives avec pressions intermittentes et les variations dans chaque couche unitaire, arriveraient à se compenser plus ou moins l'une l'autre, d'une manière statistique.

- La dispersion dans la mesure du débit est systématiquement plus élevée que celle constatée dans la mesure de la perte de charge. Ceci s'explique très bien par l'examen de la courbe caractéristique de la pompe.
- Le C.V. du rapport  $Q_v/\Delta p$  est systématiquement plus élevé que celui de l'une ou l'autre de ces deux caractéristiques. Ceci est tout à fait normal puisque des fluctuations dues au tampon fibreux, entraînent des variations opposées de  $Q_v$  et  $\Delta p$ .

2-6 - CIRCULATION D'EAU AVEC MOUILLANT - EVOLUTION DE  $Q_v$  ET  $\Delta p$  AU

=====

COURS DU TEMPS.

=====

Des premiers essais de circulation d'eau pure à 20°C et 85°C et pour différentes porosités de tampon de fibres de verre, ont parfois conduit à des résultats aberrants ; nous en avons déterminé la cause ; il s'agissait de la présence de bulles d'air difficilement éliminables, au sein du tampon fibreux.

C.V. (%) entre répétitions (3 valeurs par groupe) - Tableau 1

$\epsilon$	$\theta$ de l'eau	Après un temps de circulation de	$Q_V$	$\Delta p$	$Q_V/\Delta p$
0,92	20°C	45 min.	3,2	0,7	3,8
		60 min.	3,4	0,7	4,1
		90 min.	3,4	0,5	3,9
0,89	20°C	45 min.	3,4	0,4	3,8
		60 min.	3,8	0,6	4,3
		90 min.	4,4	0,4	4,8
0,96	85°C	45 min.	3,3	0,9	4,3
		60 min.	3,2	1,0	4,2
0,92	85°C	45 min.	1,6	0,5	1,3
		60 min.	1,9	0,8	2,6
0,89	85°C	45 min.	2,7	0,7	3,4
		60 min.	2,7	0,7	3,4

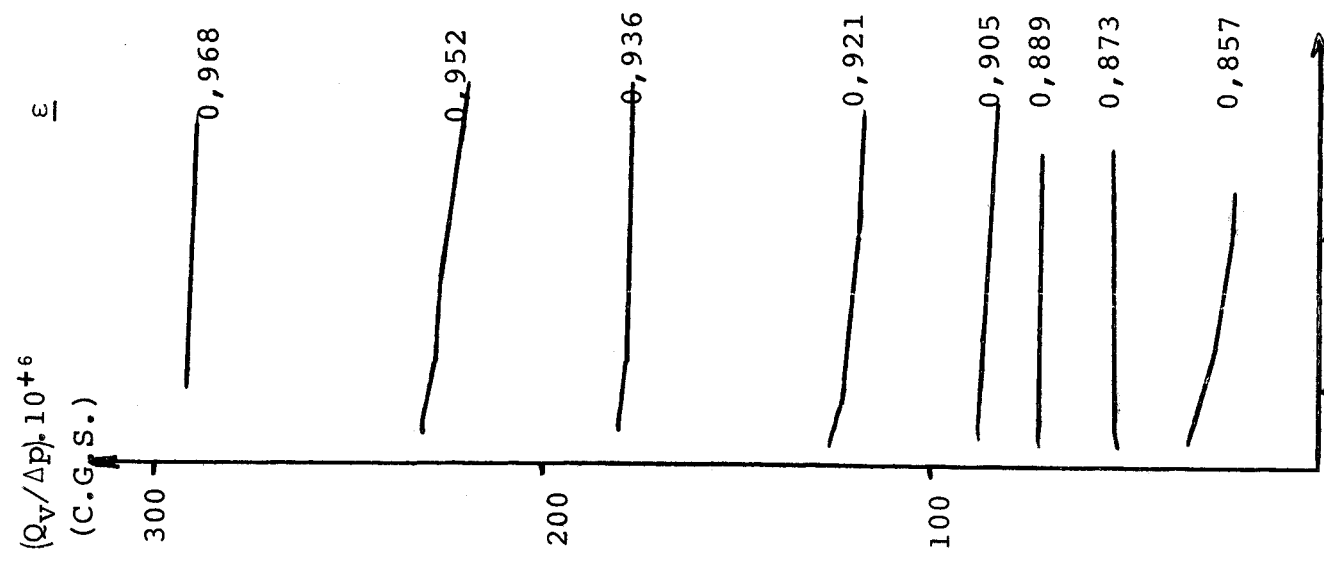
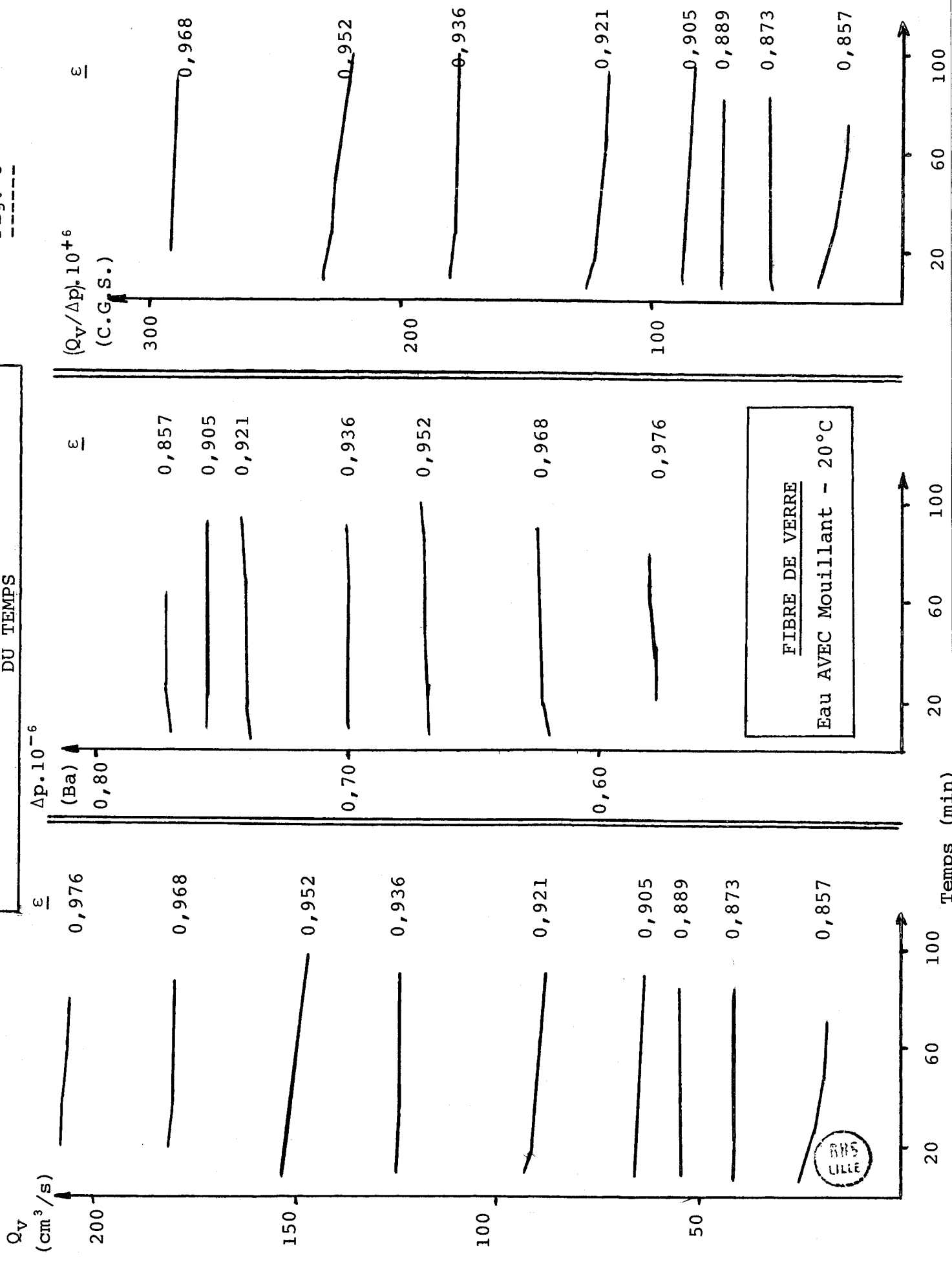
Il fallait donc réduire la tension superficielle et c'est la raison pour laquelle nous avons par la suite, adopté comme fluide de circulation, de l'eau pure contenant un mouillant à pouvoir moussant limité la "Sandozine NEC" de Sandoz, à raison de 10 ml pour 16 litres d'eau.

Les nombreux essais réalisés avec un tel fluide, à deux températures (20 et 85°C) et pour des tampons fibreux de 9 porosités (de  $\epsilon = 0,976$  à  $\epsilon = 0,857$ ) ont conduit à des résultats dont les tendances générales sont toujours sensiblement les mêmes ; c'est pourquoi nous ne présentons à la Fig. 8 que ceux relatifs à la température 20°C.

On peut y remarquer que la valeur de  $Q_V/\Delta p$  est stable au cours du temps ou décroît très légèrement ; dans ce dernier cas les 2 paramètres ( $Q_V$ ) et ( $\Delta p$ ) varient en sens inverse, ce qui montre bien

EVOLUTION DES PARAMETRES  $Q_V$ ,  $\Delta p$  AU COURS DU TEMPS

Fig. 8



FIBRE DE VERRE  
Eau AVEC Mouillant - 20°C



qu'il s'agit de petites fluctuations dues au tampon fibreux. Cette diminution éventuelle et légère de la perméabilité au cours du temps n'est pas vraisemblablement due à un gonflement de la fibre car dans ce cas, on la constaterait systématiquement. Il s'agirait peut-être d'une légère variation de la texture du milieu ou d'un colmatage très partiel des interstices, par exemple par effet filtre.

Quoi qu'il en soit et, étant donné les très faibles variations constatées, nous considérerons dans nos interprétations, la moyenne correspondant à 4 mesures successives effectuées entre les temps 30 et 90 minutes.

2-7 - PERMEABILITE ( $Q_v/\Delta p$ ) DU TAMPON FIBREUX SEUL.  
=====

Au cours de toute expérience, on mesure le débit volumique ( $Q_v$ ) et la perte de charge ( $\Delta p$ ).

Le débit volumique  $Q_v$  est le même en tout point du circuit, que ce soit dans les canalisations ou dans le tampon fibreux lui-même.

La perte de charge que l'on mesure entre les points "c" et "d" (voir Fig. 5) est la somme des pertes de charge occasionnées par les tuyauteries entre "c" et "d", par la cellule de mesure elle-même et par le tampon fibreux.

Or il est capital, pour justifier éventuellement la validité d'un modèle théorique du milieu poreux, de considérer les valeurs expérimentales de  $Q_v/\Delta p$  relatives au seul milieu fibreux. En fait, cela ne présente pas de difficulté, puisqu'il suffit pour obtenir la perte de charge relative au tampon fibreux ( $\Delta p_f$ ), de soustraire de la perte de charge totale ( $\Delta p_t$ ), les pertes de charge relatives à la cellule de mesure et aux canalisations ( $\Delta p_{CC}$ ) au même débit

$$\Delta p_f = \Delta p_t - \Delta p_{CC} \quad (12)$$

C'est la raison pour laquelle, nous avons établi les courbes caractéristiques du circuit (courbes donnant  $\Delta p_{CC}$  en fonction de  $Q_v$ ) voir Fig. 9.

2-8 - COURBES CARACTERISTIQUES DU CIRCUIT (Fig. 9)

=====

On les obtient en faisant circuler le fluide dans les canalisations et la cellule de mesure et en étranglant progressivement en "a".

On a expérimenté 3 fluides, de manière à obtenir 6 viscosités en jouant sur la température.

- Mélange Eau + Glycérol	- $\theta$ = 20°C	- $\eta$ = 2,64 cPo
- " " "	- $\theta$ = 20°C	- $\eta$ = 1,85 "
- Eau + mouillant	- $\theta$ = 20°C	- $\eta$ = 1,00 "
- " " "	- $\theta$ = 40°C	- $\eta$ = 0,66 "
- " " "	- $\theta$ = 60°C	- $\eta$ = 0,475 "
- " " "	- $\theta$ = 85°C	- $\eta$ = 0,35 "

Les courbes ainsi obtenues permettent de déterminer sans difficulté, les valeurs de  $Q_V/\Delta p$  relatives au tampon fibreux seul, selon le procédé présenté au § 2-7.

L'examen de ces courbes attire quelques remarques :

- leur allure est toujours la même et elles semblent correspondre à une fonction puissance.
- elles sont décalées les unes par rapport aux autres et ce décalage est lié à la viscosité du fluide ; toutefois, la relation  $\Delta p = f(\eta, Q_V)$  n'est pas linéaire à  $Q_V$  constant.
- la forme "quadratique" des courbes ainsi que l'influence non linéaire et limitée de la viscosité peuvent s'expliquer par le régime d'écoulement qui, dans les tuyauteries ( $\varnothing = 12$  mm) et pour les débits considérés (50 à 350 cm<sup>3</sup>/s) s'écarte notablement du mouvement laminaire. Les nombres de Reynolds calculés pour des cas extrêmes conduisent aux valeurs ci-après :

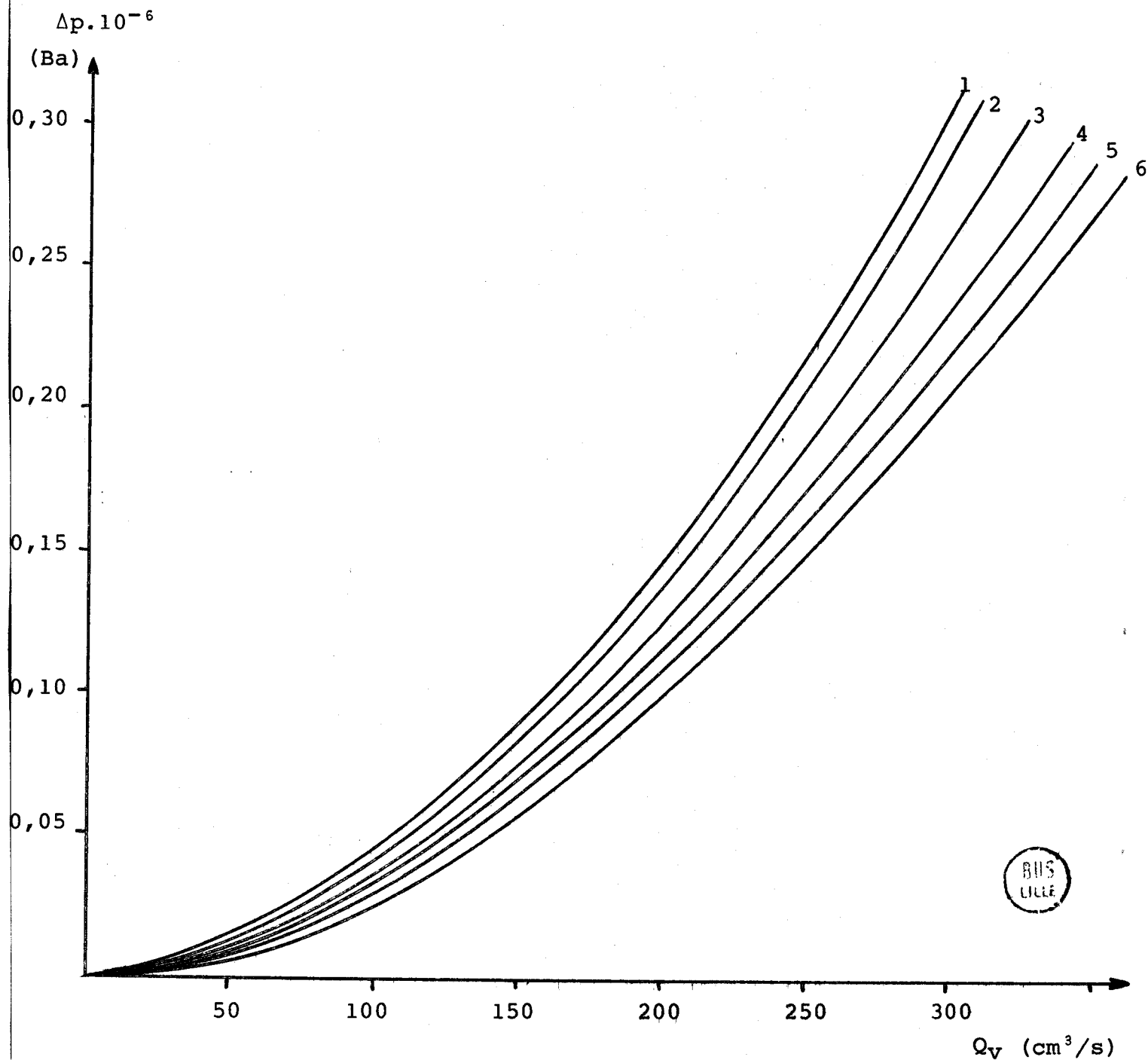
$$Q_V = 50 \text{ cm}^3/\text{s} \text{ et } \eta = 2,64 \text{ cPo} \quad - \quad Re = 2.10^3$$
$$Q_V = 350 \text{ cm}^3/\text{s} \text{ et } \eta = 0,35 \text{ cPo} \quad - \quad Re = 10^5$$

COURBES CARACTERISTIQUES DU CIRCUIT

(serrage progressif en "a")

Fig. 9

- Eau + Glyc.  $\theta = 20^{\circ}\text{C} - \eta = 2,64 \text{ cPo}$  (1)
- Eau + Glyc.  $\theta = 20^{\circ}\text{C} - \eta = 1,85 \text{ "}$  (2)
- Eau  $\theta = 20^{\circ}\text{C} - \eta = 1,00 \text{ "}$  (3)
- Eau  $\theta = 40^{\circ}\text{C} - \eta = 0,66 \text{ "}$  (4)
- Eau  $\theta = 60^{\circ}\text{C} - \eta = 0,475 \text{ "}$  (5)
- Eau  $\theta = 85^{\circ}\text{C} - \eta = 0,35 \text{ "}$  (6)





2-9 - CONDITIONS EXPERIMENTALES.

=====

On a étudié l'écoulement de 5 fluides à travers des tampons de fibre de verre de 8 porosités différentes. Dans chaque cas, on a déterminé le débit volumique ( $Q_v$ ), la perte de charge totale ( $\Delta p_t$ ) et la perte de charge relative au tampon fibreux seul ( $\Delta p_f$ ). Les tableaux 2 et 3 présentent les différentes viscosités de fluide et les différentes porosités de tampon fibreux retenues dans nos expérimentations.

Masse volumique et Viscosité des Fluides - Tableau 2

Différents FLUIDES	Eau + Glycérol	Eau + Glycérol	Eau	Eau	Eau
Température (°C)	20	20	20	40	85
Masse volumique ( $\rho$ en g/cm <sup>3</sup> )	1,075	1,05	1,00	0,99	0,97
Viscosité dynamique ( $\eta$ en cPo)	2,64	1,85	1,00	0,66	0,35

Différentes POROSITES du tampon fibreux - Tableau 3

	20	16	12	8	6	4	3	2
Masse de Fibres (g)	20	16	12	8	6	4	3	2
Masse volumique apparente du tampon ( $\rho_a$ )	0,397	0,317	0,238	0,158	0,119	0,079	0,060	0,040
Porosité du tampon ( $\epsilon$ )	0,841	0,873	0,905	0,936	0,952	0,968	0,976	0,984

Dans tous les cas, la porosité initiale ( $\epsilon$ ) du tampon, a été calculée en appliquant la relation (a15).

2-10 - DETERMINATION DU NOMBRE DE REYNOLDS.  
=====

L'application de la relation (a 14) à nos différentes conditions expérimentales, conduit aux valeurs de Nombre de Reynolds rassemblées au tableau 4. Nous reviendrons un peu plus loin sur l'utilité d'une telle détermination et sur la fixation d'un seuil délimitant les régimes d'écoulement.

Nombres de Reynolds pour diverses conditions expérimentales		Tableau 4				
Type de fluide		Eau + Glycérol	Eau + Glycérol	Eau	Eau	Eau
Température (°C)		20	20	20	40	85
Viscosité (cPo)		2,64	1,85	1,00	0,66	0,35
Masse de Fibres (g)	Porosité (ε)					
20	0,841	0,26	0,5	1,6	3,6	10,7
16	0,873	0,56	1,1	3,4	7,2	19
12	0,905	1,5	2,6	7,9	15	35
8	0,936	3,8	6,7	19	33	78
6	0,952	6,9	12,3	30	50	117
4	0,968	13,3	23,2	53	88	193
3	0,976	21	37	79	128	271
2	0,984	36	63	129	207	

2-11 - INFLUENCE DE LA POROSITE - VERIFICATION DE LA VALIDITE DE LA  
=====

RELATION DE KOZENY-CARMAN (Relation 3)  
=====

Si l'équation de KOZENY-CARMAN est directement applicable, on doit, lorsqu'on fait varier uniquement la porosité du tampon fibreux observer une relation linéaire entre  $\frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2}$  et  $\frac{Q_v}{\Delta p_f}$

Les Fig. 10 et 11 où sont représentées les valeurs prises par ces 2 variables, montrent que dans l'intervalle de porosité étudié, la relation n'est absolument pas linéaire, et ceci, pour les 5 viscosités de fluide expérimentées.

Néanmoins, on peut se demander si la relation entre ces 2 variables, ne tend pas à devenir linéaire pour les plus faibles valeurs de porosité. C'est pourquoi nous avons agrandi l'échelle en ne représentant aux Fig. 12 et 13, que les valeurs proches de l'origine, sachant de surcroît que, à la limite, la courbe doit passer par l'origine.

Nous avons également porté sur les graphes, à proximité des points représentatifs, les valeurs calculées du nombre de Reynolds. On peut alors constater que les courbes commencent à s'infléchir pour des valeurs de nombre de Reynolds comprises entre 1 et 10 et d'autant plus élevées que la viscosité du fluide est plus faible.

Il est couramment admis (6), (12), que dans les milieux poreux - (la mécanique des fluides a été peu étudiée dans les milieux fibreux proprement dits) - on s'écarte notablement du régime laminaire lorsque les valeurs du nombre de Reynolds sont supérieures à l'unité. Nos constatations ne sont pas en contradiction avec ce point de vue. Néanmoins, il ressort de façon systématique, de nos travaux, que le nombre de Reynolds critique dépendrait de la viscosité du fluide. On ne peut pas admettre une imperfection dans la relation (a14) donnant le nombre de Reynolds, car la formule que nous avons établie pour le milieu fibreux, est similaire à celles qui ont été mentionnées par d'autres chercheurs pour différents milieux poreux. Le seul terme dont la valeur est difficile à préciser est  $T$ . Nous avons adopté une valeur arbitraire, la même dans tous les cas (1,5) sachant très bien que la tortuosité devrait être plus faible lorsque la porosité est plus grande ; mais cette considération n'explique par l'intervalle constaté pour le Nombre de Reynolds critique, car si l'on en tenait compte, on augmenterait encore cet intervalle.

Fig. 10

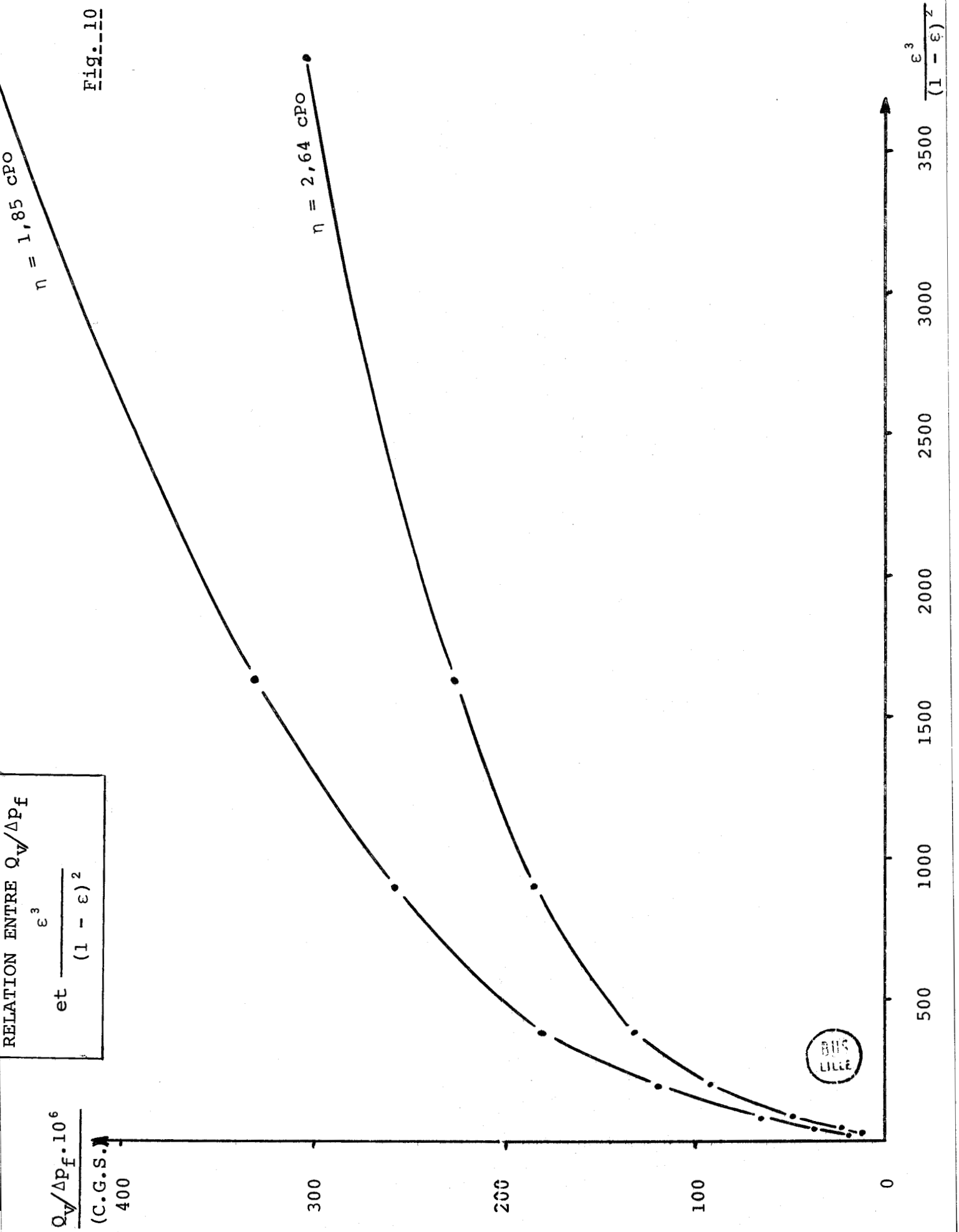


Fig. 11

ACCELERATION ENVIENS  $Q_v / \Delta P_f$   
et  $\frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2}$

$\frac{Q_v}{\Delta P_f \cdot 10^6}$   
(C.G.S.)

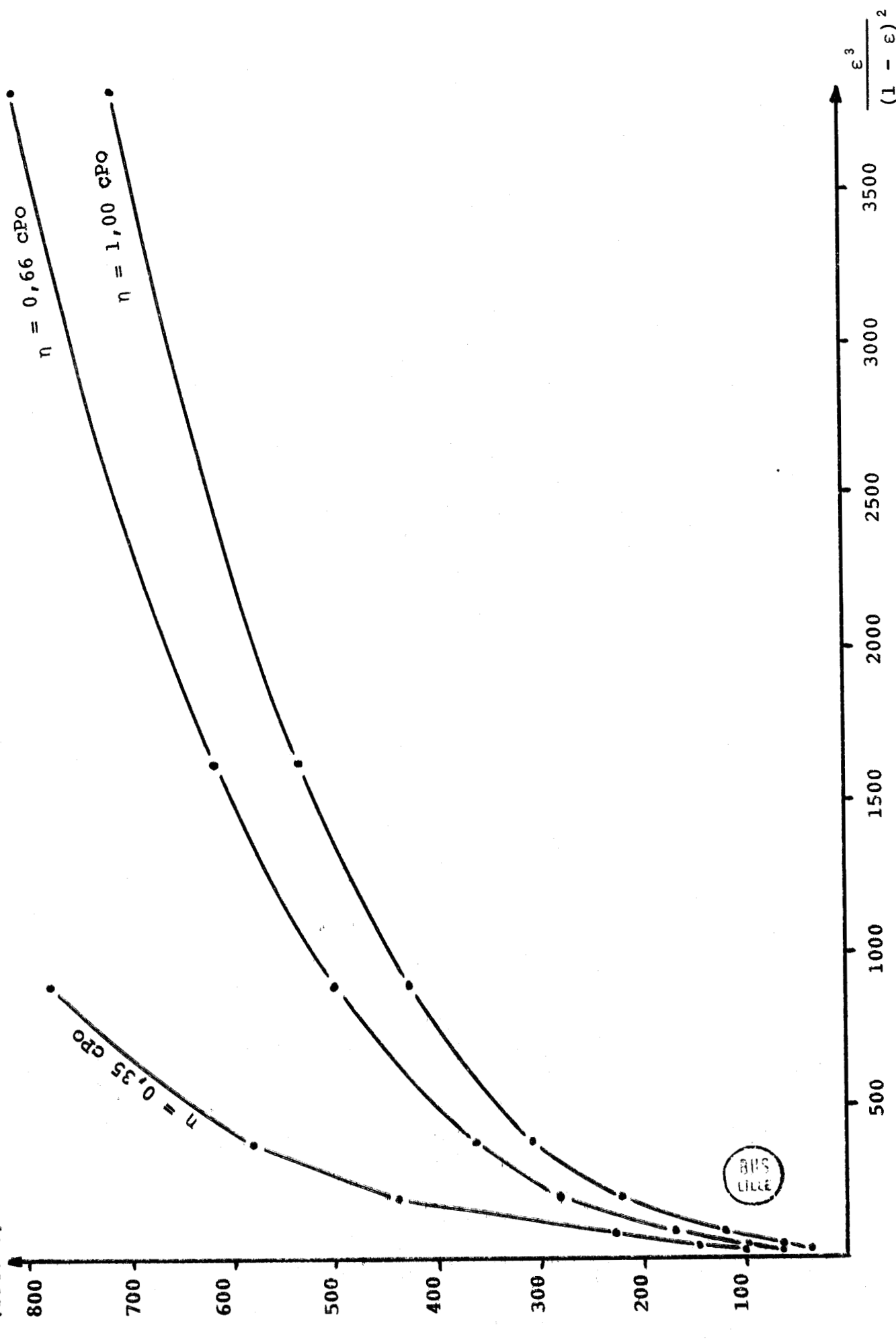


Fig. 12

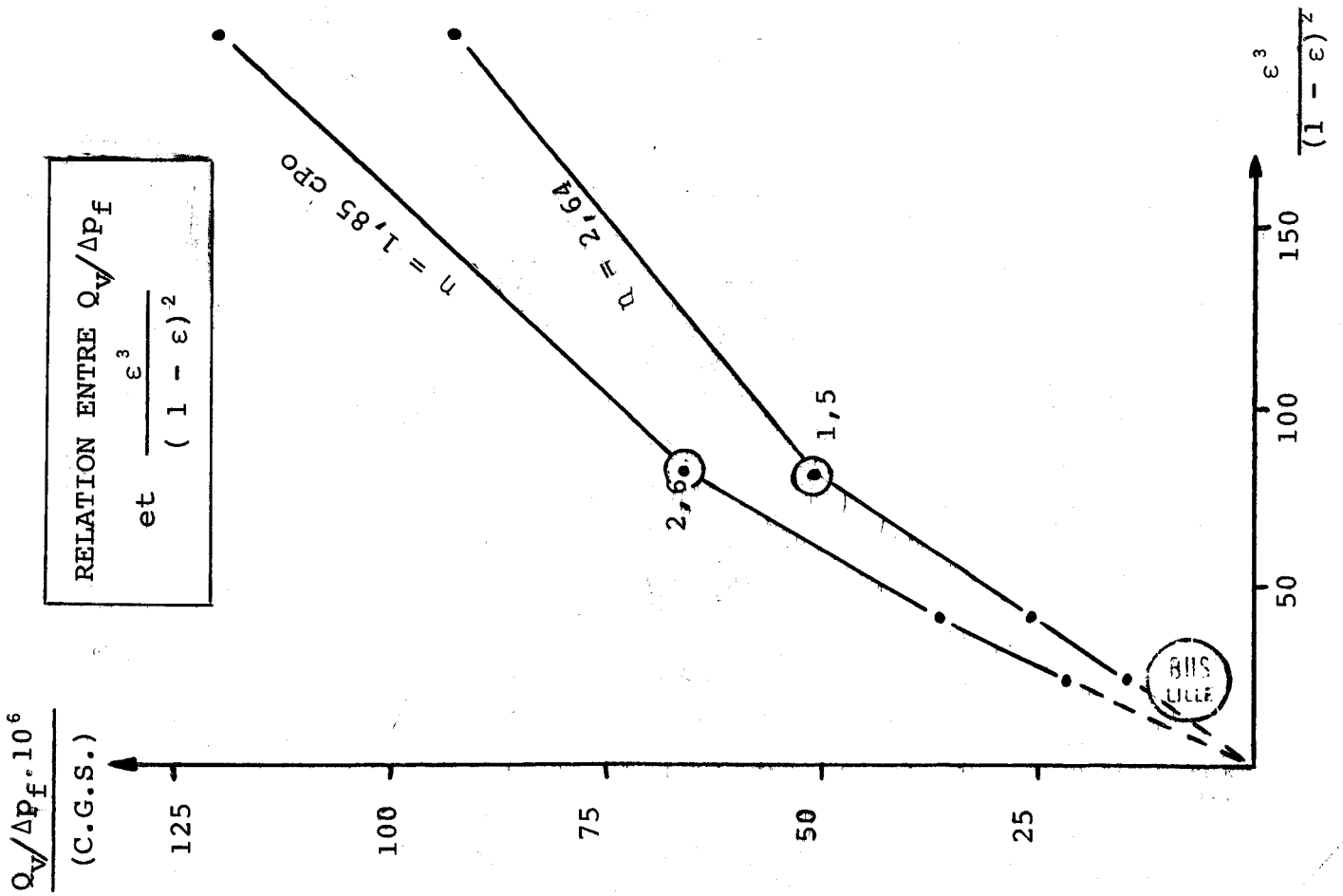
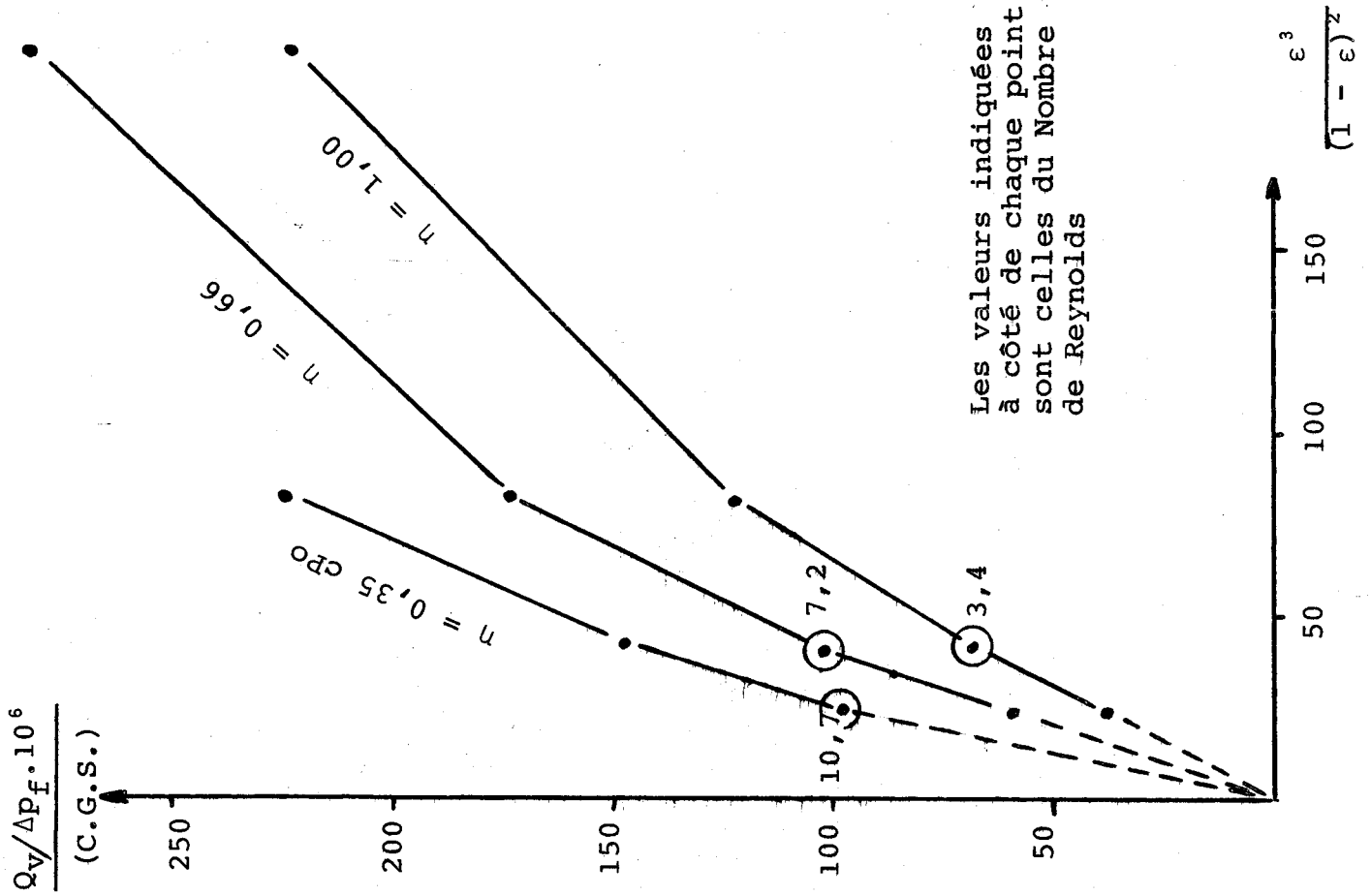


Fig. 13



Le domaine d'application de la relation de KOZENY-CARMAN (régime laminaire) peut encore être défini en calculant la constante  $h_K$ . Si la valeur de cette constante tend à devenir anormalement élevée, c'est que la relation de KOZENY-CARMAN n'est plus applicable. Nous avons transformé la relation (3) de manière à pouvoir calculer les valeurs de  $h_K$  dans nos différents cas expérimentaux.

$$h_K = \frac{S \cdot d^2 \cdot \Delta p \cdot \epsilon^3}{16 L \cdot \eta \cdot Q_V \cdot (1 - \epsilon)^2} \quad (13)$$

S, d et L étant constants et connus, la relation (13) devient :

$$h_K = \frac{10^{-7}}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{Q_V} \cdot \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \quad (14)$$

(en unités C.G.S.)

$h_K$  étant bien entendu, un nombre sans dimension.

Afin de faciliter l'interprétation, nous présentons dans un même tableau (tableau 5), les valeurs de débit volumique ( $Q_V$ ), de nombre de Reynolds (Re) et de constante de Kozeny ( $h_K$ ) pour les 5 viscosités de fluide et pour des porosités de tampon fibreux correspondant à l'écoulement laminaire ou à un régime intermédiaire.

L'examen du tableau 5 est riche d'enseignement et permet de formuler au moins 3 remarques :

- Les valeurs minimales de constante de KOZENY ( $h_K$ ) sont toujours les mêmes (6,0 et 6,1) pour différentes viscosités, différentes porosités et différents débits volumiques. Ceci est excessivement rassurant et permet d'une part, d'écarter tout doute sur la valeur des données expérimentales, d'autre part d'admettre la validité scientifique du modèle, dans l'intervalle des petits nombres de Reynolds.
- Les valeurs minimales de constante de KOZENY sont légèrement plus élevées que celles qui sont couramment admises pour des milieux granulaires ; LE GOFF et BEN AÏM (12) citent  $4,5 \pm 1$ . Néanmoins

Valeurs de  $Q_v$ ,  $Re$  et  $h_K$  pour les 5 viscosités  
et différentes porosités

Tableau 5

$\eta$ (C.G.S.)	$\epsilon$	$Q_v$ (C.G.S.)	$Re$	$h_K$
$2,64 \cdot 10^{-2}$	0,841	11,8	0,26	6,1
"	0,873	20,5	0,56	6,1
"	0,905	40,0	1,5	6,1
"	0,936	69,9	3,8	8,2 ←
"	0,952	94,9	6,9	10,9
"	0,968	121	13,3	18,6
$1,85 \cdot 10^{-2}$	0,841	17,0	0,5	6,0
"	0,873	28,5	1,1	6,1
"	0,905	50,9	2,6	6,8 ←
"	0,936	87,5	6,6	9,0
"	0,952	120,4	12,3	11,3
$10^{-2}$	0,841	29,2	1,6	6,1
"	0,873	50,4	3,4	6,1
"	0,905	86,7	7,9	6,7 ←
"	0,936	141	19,0	8,8
"	0,952	167,5	30	12,2
$0,66 \cdot 10^{-2}$	0,841	44,6	3,6	6,0
"	0,873	70,3	7,2	6,4 ←
"	0,905	115,7	15	7,2
"	0,936	162,7	33	10,9
$0,35 \cdot 10^{-2}$	0,841	71,5	10,7	6,9 ←
"	0,873	100,4	19	8,2
"	0,905	140	35	10,4



Les ← indiquent le moment à partir duquel on perçoit une augmentation de  $h_K$



nos valeurs se situent dans un intervalle conforme aux théories. En effet, la relation (7) définit comme suit, la constante de KOZENY :  $h_K = 2 \gamma T^2$  et il est couramment admis (12) que l'on peut avoir  $\gamma = 1,00 \pm 0,15$  et  $T = 1,5 \pm 0,5$ , ce qui conduit pour  $h_K$  à des valeurs extrêmes de 1,7 et 9,2. Si nos valeurs (6,0 et 6,1) sont très légèrement supérieures à celles qui ont été déterminées par d'autres chercheurs, pour d'autres milieux poreux, cela peut très bien s'expliquer par le fait que dans le milieu fibreux, la tortuosité (T) ou le facteur de non-circularité ( $\gamma$ ) seraient légèrement plus élevés que dans les milieux poreux granuleux.

- Les valeurs de  $h_K$  restent constantes pour des débits faibles et des Nombres de Reynolds peu élevés, puis on assiste à une augmentation de  $h_K$ . Cette évolution de la constante de KOZENY a été signalée par de nombreux chercheurs (6), (11), (12). Un certain nombre d'entre eux considèrent que  $h_K$  est stable pour des porosités faibles, puis augmente avec la porosité, surtout lorsque l'on a  $\epsilon > 0,8$ . Par exemple DAVIES (15) propose la relation suivante :

$$h_K = \frac{\beta \cdot \epsilon^3}{(1 - \epsilon)^{1/2}} \cdot \left[ 1 + \delta (1 - \epsilon)^3 \right] \quad (15)$$

$$\text{avec } \beta = 4 \text{ et } \delta = 56$$

Nous ne sommes pas totalement d'accord avec ce point de vue. Les valeurs présentées au tableau 5 font ressortir très clairement que l'évolution de  $h_K$  dépend non seulement de la porosité du tampon fibreux, mais aussi de la viscosité du bain. Par ailleurs, nous considérons que lorsque  $h_K$  évolue, c'est tout simplement que la relation de KOZENY n'est plus applicable et nous reconnaissons avec LE LEC (11) que vouloir calculer la valeur d'une "constante qui fluctue" ne constitue qu'une extension empirique (voire même abusive) d'un modèle inadapté. Quoi qu'il en soit, les nombres de Reynolds à partir desquels la constante de KOZENY évolue correspondent bien à ceux que nous avons portés aux Fig. 12 et 13 et ils sont d'autant plus élevés que la viscosité du fluide est plus faible.

2-12 - INFLUENCE DE LA POROSITE - VERIFICATION DE LA RELATION  
=====

GENERALE (10) POUR MILIEU POREUX.  
=====

Si une telle équation est applicable, on doit observer une relation linéaire entre  $Q_v^2/\Delta p_f$  et  $\frac{\epsilon_3}{1-\epsilon}$  lorsqu'on fait varier uniquement la porosité du tampon fibreux (en supposant constant, le coefficient de perte de charge  $\lambda$ , que l'on a remplacé par  $k_1$  dans la relation 10).

La mise sur graphe des points représentatifs des couples de valeurs prises par ces 2 variables (voir Fig. 14 et 15) permet de remarquer ce qui suit :

Au voisinage de l'origine, pour de petits nombres de Reynolds, la relation n'est absolument pas linéaire. Ceci s'explique très bien puisque l'on sait qu'en régime laminaire, en régime intermédiaire et même en début de régime turbulent, le coefficient de perte de charge dépend du Nombre de Reynolds.

En régime laminaire, c'est-à-dire pour de petits nombres de Reynolds, le coefficient de perte de charge  $\lambda$  est, en principe, fonction inverse de Re. Comme dans la relation (10),  $\lambda$  (que nous avons remplacé par  $k_1$ ) intervient au dénominateur,  $Q_v^2/\Delta p_f$  serait fonction directe de Re, et c'est la raison pour laquelle, toutes les courbes sont concaves vers le haut, au voisinage de l'origine.

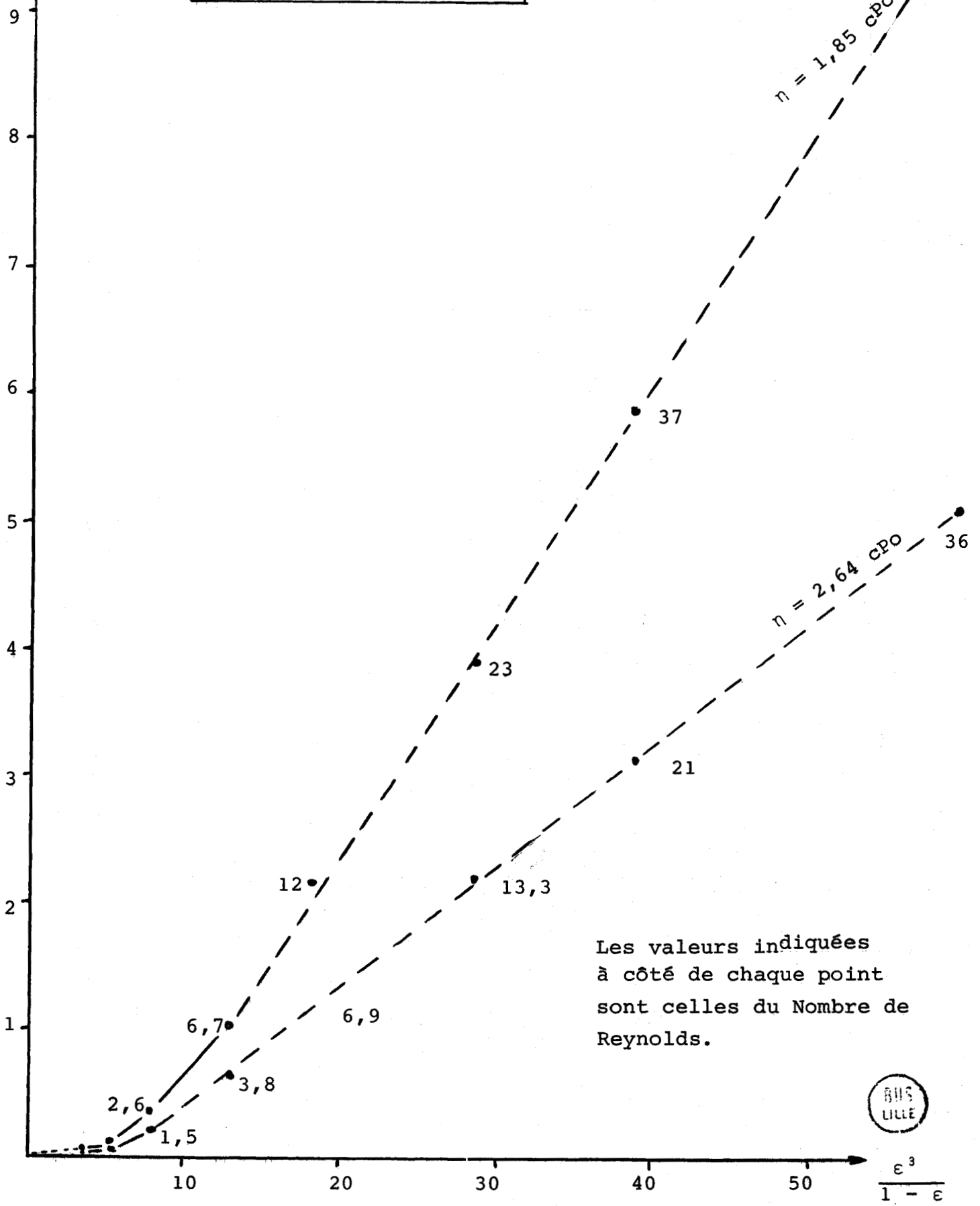
Dans le cas de conduite, on sait que, lorsque le régime n'est plus laminaire,  $\lambda$  tend à devenir constant pour des valeurs élevées du nombre de Reynolds, c'est-à-dire en régime franchement turbulent. En régime intermédiaire ou faiblement turbulent,  $\lambda$  peut augmenter ou décroître selon le type de tuyauterie (16).

Dans notre cas (c'est-à-dire tampon poreux fibreux, on constate lorsque le Nombre de Reynolds est supérieur à des valeurs de l'ordre de 5 - 10 (c'est-à-dire lorsque le régime laminaire n'est plus applicable), soit une relation linéaire (Fig. 14) ce qui signifie que dans ce cas  $\lambda$  (ou  $k_1$ ) est constant, soit des courbes à légères concavités vers le bas (Fig. 15) ce qui signifie que dans ce cas,  $\lambda$  (ou  $k_1$ ) augmente un peu avec le nombre de Reynolds.

RELATION ENTRE  $Q_V^2 / \Delta p_f$   
et  $\frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon}$

Fig. 14

$Q_V^2 / \Delta p_f \cdot 10^2$   
(C.G.S.)

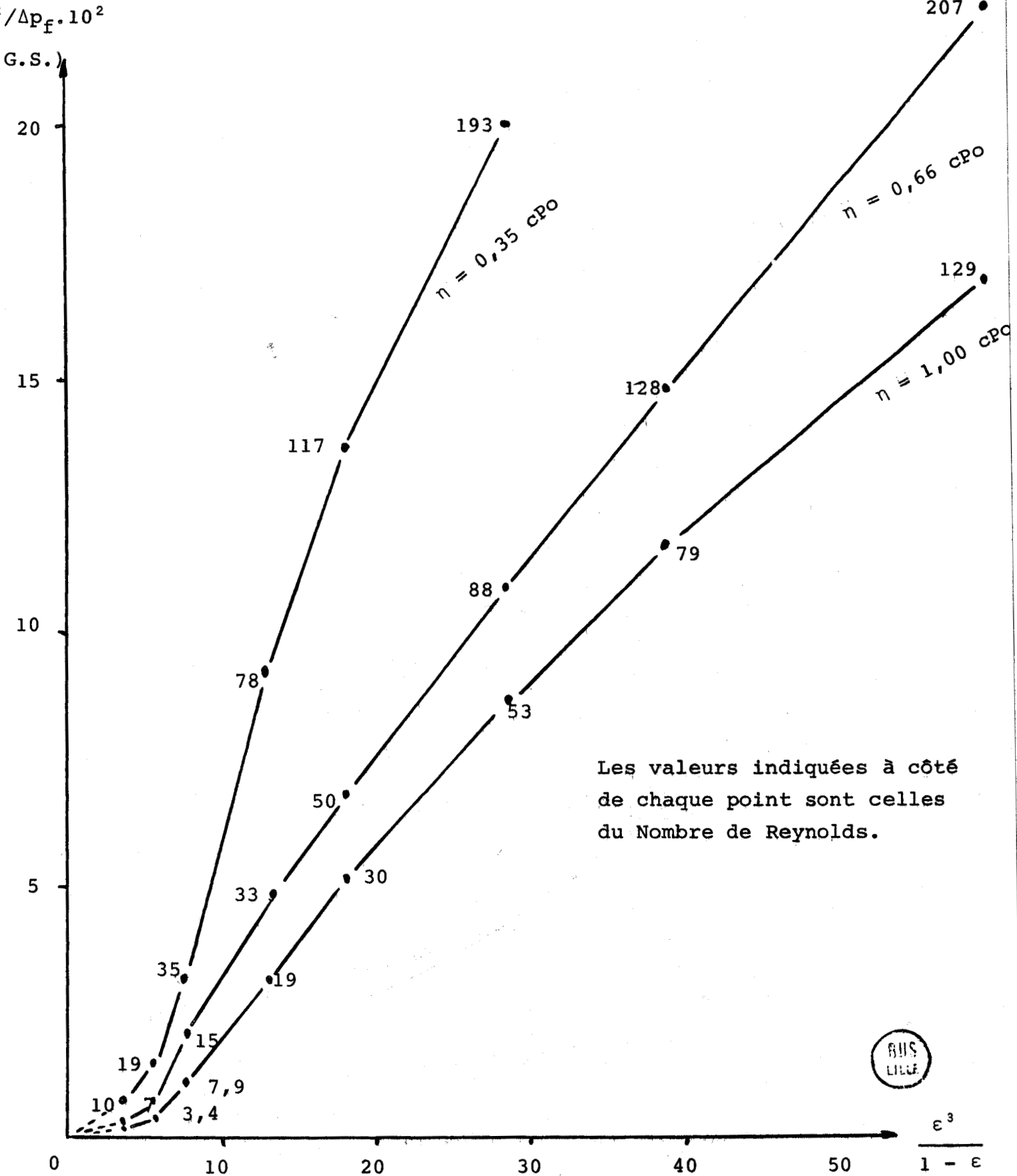


Les valeurs indiquées  
à côté de chaque point  
sont celles du Nombre de  
Reynolds.



RELATION ENTRE  $Q_v^2/\Delta p_f$  et  $\frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon}$

Fig. 15



Les valeurs indiquées à côté de chaque point sont celles du Nombre de Reynolds.



Les points d'inflexion des courbes des Fig. 14 et 15 doivent traduire une modification du régime d'écoulement ; cela se produit pour des nombres de Reynolds compris entre 1,5 et 19 et variables selon la viscosité du fluide. Cet aspect particulier de l'influence de la viscosité a déjà été mentionné au paragraphe précédent dans la définition du nombre de Reynolds critique ; nous le retrouverons encore dans la suite de ce travail.

2-13 - INFLUENCE DE LA VISCOSITE DU BAIN - VALIDITE DE LA RELATION  
=====

DE KOZENY-CARMAN.  
=====

L'équation de KOZENY-CARMAN (3) fait apparaître une proportionnalité inverse entre  $Q_V/\Delta p_f$  et  $\eta$ . Si elle est applicable, on doit donc, lorsqu'on fait varier la viscosité dynamique du fluide, observer une relation linéaire entre  $Q_V/\Delta p_f$  et  $1/\eta$ . Plus exactement, on doit obtenir des droites passant par l'origine.

La Fig. 16 qui regroupe sous forme graphique, les différents couples de valeurs prises par ces 2 variables, permet de juger de la validité de cette hypothèse.

On peut remarquer qu'au voisinage de l'origine, c'est-à-dire pour de petites valeurs de nombre de Reynolds, les courbes sont généralement des droites dont le prolongement passe par l'origine. Mais à un certain moment, ces courbes présentent une inflexion et ceci, pour des viscosités d'autant plus élevées que la porosité est grande. Ces inflexions se produisent pour des nombres de Reynolds allant de 3,6 à 23, avec un effet systématique, c'est-à-dire que le  $Re$  critique est d'autant plus élevé que la viscosité et la porosité sont grandes. Au delà de  $Re$  critique, la relation de KOZENY n'est plus directement applicable, mais il y a encore une influence certaine de la viscosité du fluide sur la valeur de  $Q_V/\Delta p_f$  qui est presque doublée lorsque la viscosité passe de 1 à 0,35 cPo.

2-14 - ESSAI D'APPLICATION DE LA RELATION MIXTE (11)  
=====

L'influence de la viscosité, même en régime intermédiaire ou turbulent, ne permet pas de retenir la relation générale (10) dans

Les points d'inflexion des courbes des Fig. 14 et 15 doivent traduire une modification du régime d'écoulement ; cela se produit pour des nombres de Reynolds compris entre 1,5 et 19 et variables selon la viscosité du fluide. Cet aspect particulier de l'influence de la viscosité a déjà été mentionné au paragraphe précédent dans la définition du nombre de Reynolds critique ; nous le retrouverons encore dans la suite de ce travail.

2-13 - INFLUENCE DE LA VISCOSITE DU BAIN - VALIDITE DE LA RELATION  
=====

DE KOZENY-CARMAN.  
=====

L'équation de KOZENY-CARMAN (3) fait apparaître une proportionnalité inverse entre  $Q_V/\Delta p_f$  et  $\eta$ . Si elle est applicable, on doit donc, lorsqu'on fait varier la viscosité dynamique du fluide, observer une relation linéaire entre  $Q_V/\Delta p_f$  et  $1/\eta$ . Plus exactement, on doit obtenir des droites passant par l'origine.

La Fig. 16 qui regroupe sous forme graphique, les différents couples de valeurs prises par ces 2 variables, permet de juger de la validité de cette hypothèse.

On peut remarquer qu'au voisinage de l'origine, c'est-à-dire pour de petites valeurs de nombre de Reynolds, les courbes sont généralement des droites dont le prolongement passe par l'origine. Mais à un certain moment, ces courbes présentent une inflexion et ceci, pour des viscosités d'autant plus élevées que la porosité est grande. Ces inflexions se produisent pour des nombres de Reynolds allant de 3,6 à 23, avec un effet systématique, c'est-à-dire que le  $Re$  critique est d'autant plus élevé que la viscosité et la porosité sont grandes. Au delà de  $Re$  critique, la relation de KOZENY n'est plus directement applicable, mais il y a encore une influence certaine de la viscosité du fluide sur la valeur de  $Q_V/\Delta p_f$  qui est presque doublée lorsque la viscosité passe de 1 à 0,35 cPo.

2-14 - ESSAI D'APPLICATION DE LA RELATION MIXTE (11)  
=====

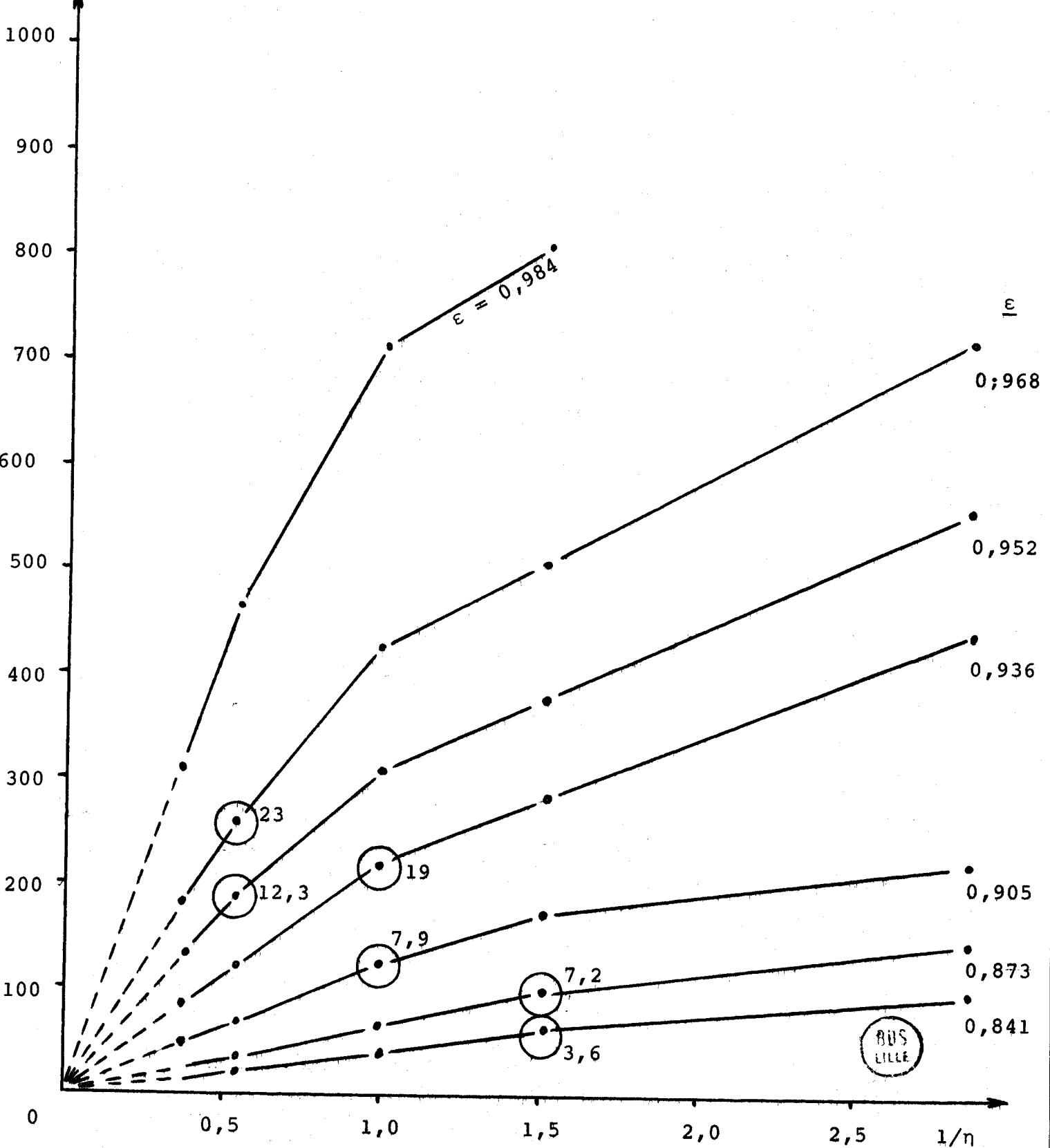
L'influence de la viscosité, même en régime intermédiaire ou turbulent, ne permet pas de retenir la relation générale (10) dans

RELATION ENTRE  $Q_v/\Delta p_f$  et  $1/\eta$

(Fibre de verre)

Fig. 16

$Q_v/\Delta p_f \cdot 10^6$   
(C.G.S.)



laquelle le paramètre ( $\eta$ ) n'apparaît pas. Il paraît donc opportun d'essayer d'appliquer à nos résultats expérimentaux, l'équation (11) où l'on retrouve le modèle de KOZENY avec en plus, une expression tenant compte de la dégradation de l'énergie dans les remous.

Pour pouvoir déterminer la constante  $k_2$  de cette expression, nous l'avons transformée de la manière suivante :

$$k_2 = \frac{S^2 \cdot d \cdot \Delta p \cdot \epsilon^3}{4 \cdot L \cdot Q_V^2 \cdot \rho (1 - \epsilon)} - \frac{4 h_K \cdot S \cdot \eta (1 - \epsilon)}{d \cdot Q_V \cdot \rho} \quad (16)$$

Nous avons pris pour  $h_K$ , la valeur 6,0 trouvée dans nos travaux expérimentaux et correspondant à l'écoulement laminaire. Par ailleurs,  $S$ ,  $d$  et  $L$  étant constants et connus, la relation (16) devient :

$$k_2 = 7,0 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta p}{Q_V^2} \cdot \frac{\epsilon^3}{\rho (1 - \epsilon)} - 4,17 \cdot 10^5 \frac{\eta \cdot (1 - \epsilon)}{Q_V \cdot \rho} \quad (17)$$

(en unités C.G.S.)

$k_2$  étant bien entendu, un nombre sans dimension.

Les calculs effectués à partir des données provenant des 39 cas expérimentaux font ressortir que  $k_2$  n'est pas constant et son évolution en fonction de la viscosité et de la porosité est assez systématique.  $k_2$  serait d'autant plus grand que la viscosité et la porosité sont plus élevées. Cette interaction viscosité/porosité est assez caractéristique et a déjà été signalée dans nos précédentes interprétations et notamment en ce qui concerne le  $Re$  critique. Pourtant on ne peut mettre en doute nos valeurs de viscosité qui sont tout à fait vraisemblables et conformes à ce qui est couramment admis pour l'eau. Nos valeurs de porosité paraissent également indubitables puisque en régime laminaire elles ont permis l'obtention d'une constante de KOZENY stable et vraisemblable.

Il faut donc convenir que la relation (11) n'est pas applicable à nos conditions expérimentales. D'ailleurs il est connu (12) que l'équation d'ERGUN qui est similaire à notre relation (11) et qui comporte comme elle un terme correspondant à l'écoulement glissant et un autre correspondant à une perte d'énergie dans les remous, n'est pas applicable à n'importe quel milieu poreux.



Valeurs de "k<sub>2</sub>" de la Relation 17 pour les  
5 viscosités et les 8 porosités

Tableau 6

	ε	0,841	0,873	0,905	0,936	0,952	0,968	0,976	0,984
$\eta = 2,64 \cdot 10^{-2}$	Q <sub>v</sub>	11,8	20,5	40,0	69,9	94,9	121	146	166,5
	Δp.10 <sup>-5</sup>	8,07	7,99	7,87	7,59	7,24	6,67	6,02	5,43
	k <sub>2</sub>	3,2	1,4	0,7	3,6	4,2	5,4	5,7	6,6
$\eta = 1,85 \cdot 10^{-2}$	Q <sub>v</sub>	17,0	28,5	50,9	87,5	120,4	151,8	181	205,7
	Δp.10 <sup>-5</sup>	7,89	7,85	7,74	7,28	6,69	5,91	5,25	4,36
	k <sub>2</sub>	0,1	1,0	1,8	2,6	2,7	3,2	3,2	3,5
$\eta = 10^{-2}$	Q <sub>v</sub>	29,2	50,4	86,7	141	167,5	197,9	220	239
	Δp.10 <sup>-5</sup>	7,56	7,39	7,04	6,13	5,44	4,64	4,30	3,36
	k <sub>2</sub>	0,5	0,2	0,5	0,9	1,2	1,6	1,9	2,2
$\eta = 0,66 \cdot 10^{-2}$	Q <sub>v</sub>	44,6	70,3	115,7	162,7	187	217	238	256
	Δp.10 <sup>-5</sup>	7,46	7,24	6,69	5,77	5,17	4,33	3,98	3,16
	k <sub>2</sub>	0,1	0,4	0,5	0,9	1,2	1,4	1,6	1,8
$\eta = 0,35 \cdot 10^{-2}$	Q <sub>v</sub>	71,5	100,4	140	209	235	258	272	
	Δp.10 <sup>-5</sup>	7,28	6,94	6,22	4,74	4,03	3,32	2,90	
	k <sub>2</sub>	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	

Les valeurs de ρ, η, Q<sub>v</sub> et Δp sont exprimées dans le système C.G.S.

Dans un travail réalisé à la B.A.S.F. sur ensouples de tissu (3) KRETSCHMER propose la relation suivante :



$$\Delta p = 1560 \cdot 10^6 \cdot d \cdot K \cdot D_E \cdot \varphi \left[ \left( \frac{v}{1 + \varphi} \right)^2 + \frac{v}{1 + \varphi} \cdot \frac{450v}{d} \right] \quad (18)$$

$\Delta p$  étant la perte de charge ;

$d$  le diamètre de la fibre ;

$K$  une caractéristique de perméabilité à l'air, du tissu, déterminée expérimentalement ;

$D_E$  le diamètre de l'ensouple ;

$\varphi$  le rapport  $\frac{\text{épaisseur du tissu}}{\text{diamètre de l'ensouple}}$  ;

$v$  la vitesse d'écoulement ;

$\nu$  la viscosité cinématique du fluide.

Cette équation est assez semblable à notre relation (11) puisqu'elle fait intervenir la vitesse d'écoulement à 2 degrés différents : au degré 2 et que l'auteur appelle "turbulence du bain" et au degré 1 et que l'auteur appelle "friction du bain".

Néanmoins, il est permis de douter de la validité d'application de la relation (18) aux ensouples industrielles, car à aucun endroit de la publication de KRETSCHMER, on ne trouve la justification d'application de son modèle.

Chapitre III

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ÉCOULEMENT A TRAVERS UN TAMPON  
DE FIBRES DE POLYESTER

Après l'étude des phénomènes d'écoulement de fluides à travers un tampon de fibres inertes vis-à-vis du milieu liquide, il était logique d'étendre les investigations à de véritables fibres textiles. Mais il fallait cerner progressivement l'influence des différents facteurs. C'est la raison pour laquelle, avant d'aborder le cas de fibres naturelles aux réactions complexes, nous nous sommes limités à un cas plus simple, en étudiant le comportement d'une fibre qui, vis-à-vis de l'eau, ne freinte pas et ne peut présenter qu'un éventuel comportement de gonflement : il s'agit de la fibre de POLYESTER.

3-1 - INSTALLATION EXPERIMENTALE ET ECHANTILLONNAGE.  
=====

- a) Le montage expérimental (y compris la cellule de mesure) est celui qui a précédemment servi aux travaux réalisés sur fibre de verre (voir Ch. 2, § 2-2 et § 2-3).
- b) La fibre utilisée est un polyester "coupe coton" de longueur moyenne comprise entre 2 et 3 cm et dont nous avons déterminé 2 caractéristiques essentielles :
- la masse volumique :  $\rho_f = 1,39 \text{ g/cm}^3$  (moyenne de 5 mesures), cette valeur correspond bien à ce qui est couramment admis.
  - le diamètre (la fibre étant pratiquement cylindrique)  
 $d = 17,5 \text{ } \mu\text{m}$  (moyenne de 50 mesures)

Cette valeur est, elle aussi, excessivement vraisemblable et elle correspond bien aux données du fournisseur qui annonce un titre de 3 deniers.

On sait que le titre en denier  $T_d$  d'une fibre cylindrique s'exprime par :

$$T_d = 7,06 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 \cdot \rho_f \quad (19)$$

3-2 - CONDITIONS EXPERIMENTALES.

Au cours des expérimentations présentées au chapitre II, nous avons utilisé des mélanges d'eau et de glycérol afin d'obtenir, à température constante, différentes viscosités de fluides. A présent, nous n'avons retenu qu'un seul fluide : l'eau, puisqu'il s'agit de l'unique liquide couramment utilisé pour la constitution des bains industriels de blanchiment et de teinture.

On a travaillé comme précédemment, à 3 températures (20 - 40 et 85° C) conduisant pour l'eau, aux viscosités dynamiques suivantes : 1,00 - 0,66 et 0,35 centipoises.

Le tableau 7 présente les masses volumiques apparentes et les porosités des différents tampons fibreux réalisés au cours de nos expérimentations. Le calcul des porosités s'établit aisément au moyen de la relation :  $\epsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_f}$  (20)

Différentes POROSITES du tampon fibreux

Tableau 7

	24	22	20	16	12	8	6	4
Masse de Fibres (g)								
Masse volumique apparente du tampon ( $\rho_a$ )	0,476	0,436	0,396	0,317	0,238	0,158	0,119	0,079
Porosité du tampon ( $\epsilon$ )	0,657	0,686	0,714	0,771	0,828	0,886	0,914	0,943

La fibre de polyester étant plus grosse et surtout beaucoup plus souple que la fibre de verre, il a été possible d'obtenir des porosités nettement plus faibles que celles qui sont présentées au Ch. 2. Toutefois, la valeur  $\epsilon = 0,657$  constitue une limite au-delà de laquelle la réalisation du tampon fibreux est impossible en raison de la force excessive qu'il faut exercer pour le comprimer.

Dans tous les cas, on a déterminé au cours du temps, le débit volumique ( $Q_v$ ), la perte de charge totale ( $\Delta p_t$ ) et la perte de charge relative au tampon fibreux seul ( $\Delta p_f$ ).

### 3-3 - EVOLUTION DE $Q_v$ et $\Delta p$ AU COURS DU TEMPS.

=====

Les mesures ont été effectuées toutes les 15 minutes environ, du temps 5 minutes au temps 90 minutes.

Pour faciliter l'interprétation, nous n'avons représenté à la Fig. 17 que les valeurs de  $Q_v/\Delta p$ , c'est-à-dire le paramètre caractérisant la perméabilité, et ceci pour 2 températures : 20 et 85°C, les tendances étant rigoureusement les mêmes à 40°C. Il est possible d'en tirer plusieurs leçons importantes :

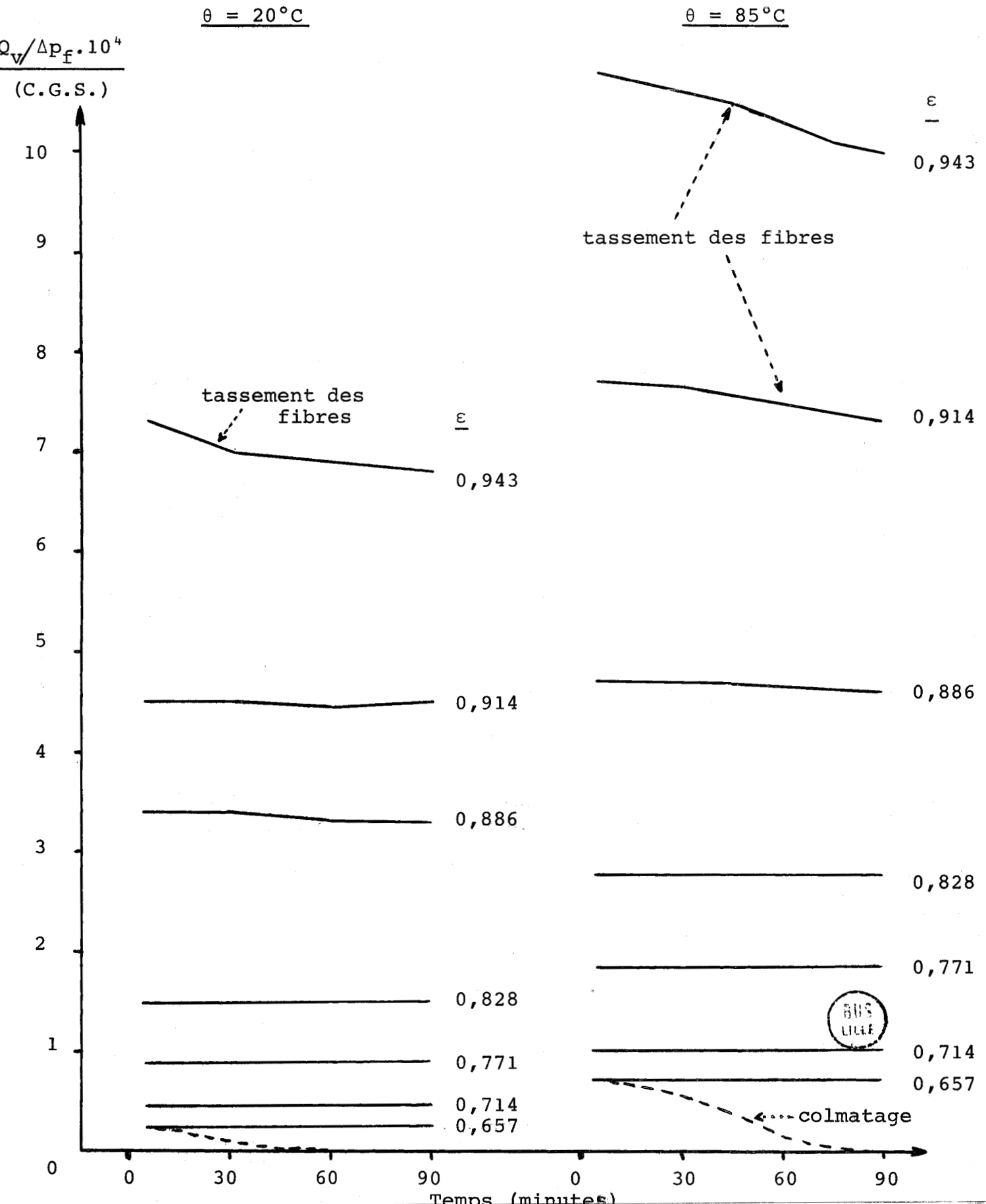
1) Pour des porosités qui ne sont pas trop élevées ( $\epsilon < 0,914$ ), la perméabilité ne varie pratiquement pas au cours du temps. On peut donc dire que la fibre ne gonfle pas ; ou alors si un gonflement se produisait, ce serait entre 0 et 5 minutes. Néanmoins nous verrons au § 3-4, comment on peut, avec certitude, écarter l'hypothèse d'un éventuel gonflement.

2) Lorsque la perméabilité varie, cela peut avoir 2 raisons :

- la porosité est trop élevée ( $\epsilon = 0,943$  à 20°C et même  $\epsilon = 0,914$  à 85°C). Dans ce cas, il se produit au cours du temps, un tassement du tampon fibreux dû à la pression exercée par le fluide ; ceci diminue la porosité et conséquemment la perméabilité. Ce tassement est bien connu des praticiens, et pour une même porosité initiale, il est très variable d'une fibre à l'autre.

EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DE  $Q_V/\Delta P_f$   
FIBRE DE POLYESTER - EAU AVEC MOUILLANT

Fig. 17



- la porosité est relativement faible ( $\epsilon = 0,657$ ). Alors il se produit un colmatage des pores, en particulier lorsque l'eau utilisée n'est pas rigoureusement exempte de particules solides. Ce colmatage diminue très fortement la perméabilité et peut aller jusqu'à annihiler le débit du fluide (voir courbes en pointillé de la Fig 17). Bien entendu, dans nos interprétations ultérieures, nous avons exclu les valeurs résultant de ce phénomène.

Cet "effet-filtre" n'est pas ignoré des praticiens, mais il est possible que ces derniers n'en connaissent pas totalement les méfaits, en particulier lorsque l'appareillage ne comporte pas de débitmètre. En effet, le manomètre différentiel (même lorsqu'il est suffisamment précis), ne permet pas de déceler en cours de marche, un tel phénomène car on se situe alors dans une zone où une variation importante de débit correspond à une faible variation de pression.

Etant donné les très faibles variations au cours du temps, nous avons retenu pour l'interprétation des résultats, les moyennes correspondant à 5 mesures successives effectuées entre les temps 30 et 90 minutes.

### 3-4 - DOMAINE DE VALIDITE DE LA RELATION DE KOZENY.

Le moyen le plus pratique pour déterminer l'intervalle de ce domaine, est de calculer la constante de KOZENY, dans tous les cas expérimentaux, au moyen de la relation (13). Lorsque la valeur de  $h_K$  reste constante ou tout au moins varie très peu, c'est que le modèle théorique est applicable.

Les valeurs de S, d et L étant constantes et connues, la relation (13) devient :

$$h_K = \frac{5,95 \cdot 10^{-7}}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{Q_V} \cdot \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \quad (21)$$

les différentes grandeurs étant exprimées en unités C.G.S.

Nous avons également déterminé les valeurs du nombre de Reynolds au moyen de la relation (a14) qui, pour nos conditions expérimentales, s'écrit :

$$Re = 2,1 \cdot 10^{-4} \frac{\rho \cdot Q_V}{\eta \cdot (1 - \epsilon)} \quad (22)$$

les différentes grandeurs étant exprimées en unités C.G.S.

Toutes ces valeurs sont rassemblées au tableau 8 d'où l'on peut tirer les leçons suivantes :

- 1) Dans chaque série, les valeurs minimales de constante de KOZENY sont pratiquement les mêmes : 5,5 - 5,6 - 5,7. Cette concordance permet d'être assuré de l'exactitude des données expérimentales.
- 2) Ces valeurs s'accordent bien avec celles qui sont couramment admises pour des milieux poreux granulaires ( $4,5 \pm 1$ ). Elles sont un peu plus faibles que celles observées sur fibres de verre et présentées au Ch. II. Or, les différences essentielles entre nos 2 types de fibre sont la finesse et la souplesse (fibres de polyester plus grosses et surtout beaucoup plus souples). En régime laminaire, la constante de KOZENY étant surtout conditionnée par la tortuosité (T) et le facteur de non-circularité ( $\gamma$ ) (voir relation 7), il est vraisemblable que dans le cas du polyester, en raison de la souplesse des fibres et des porosités plus faibles réalisées, le facteur de non-circularité soit plus petit.
- 3) On peut considérer que l'écoulement est laminaire et la relation de KOZENY applicable lorsque les valeurs de  $h_K$  sont stables (dans notre cas : 5,5 à 5,7). Les nombres de Reynolds critiques au-delà desquels l'écoulement ne peut plus être considéré comme laminaire sont, dans notre cas : 2,6 - 6,0 - 9,2.

Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles qui ont été relevées avec les tampons de fibre de verre et on retrouve les mêmes tendances, à savoir que le Nombre de Reynolds critique est d'autant plus élevé que la viscosité du fluide est plus faible.



VALEURS de "Re" et "h<sub>K</sub>" POUR LES DIFFERENTS CAS  
EXPERIMENTAUX - FIBRE DE POLYESTER

Tableau 8

	$\varepsilon$	$\frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}$	$Q_V$	$\Delta p_f \cdot 10^{-5}$	$\frac{Q_V}{\Delta p_f} \cdot 10^6$	$h_K$	$Re$
$\eta = 10^{-2}$ $\rho = 1,00$	0,657	2,41	18,9	7,60	24,9	5,8	1,1
	0,686	3,26	25,8	7,58	34,0	5,7	1,7
	0,714	4,46	35,1	7,52	46,7	5,7	2,6
	0,771	8,8	64,0	7,33	87,2	6,0	5,9
	0,828	19,35	104	6,82	152,5	7,5	12,7
	0,886	53,2	176	5,23	336	9,4	32,5
	0,914	104	203	4,53	448	13,8	49,5
	0,943	256	240	3,48	690	22,1	88
$\eta = 0,66 \cdot 10^{-2}$ $\rho = 0,99$	0,657	2,41	29,4	7,58	38,7	5,6	2,7
	0,686	3,26	39,5	7,51	52,6	5,6	3,9
	0,714	4,46	54,2	7,42	73	5,5	6,0
	0,771	8,8	87,4	7,06	124	6,4	12
	0,828	19,35	138	6,20	223	7,8	25
	0,886	53,2	203	4,82	421	11,4	56
	0,914	104	230	4,05	567	16,5	84
	0,943	256	259	3,14	825	28,0	143
$\eta = 0,35 \cdot 10^{-2}$ $\rho = 0,97$	0,657	2,41	54,7	7,50	73	5,6	9,2
	0,686	3,26	67,8	7,34	92,2	6,0	12,5
	0,714	4,46	76,6	7,11	108	7,0	14,7
	0,771	8,8	121	6,44	188	8,0	31
	0,828	19,35	159	5,72	278	11,8	54
	0,886	53,2	209	4,53	461	19,7	106
	0,914	104	255	3,42	746	23,7	172
	0,943	256	278	2,73	1015	42,8	283

Toutes les grandeurs sont exprimées en unités C.G.S.



- 4) Les valeurs de  $h_K$  qui ont été calculées à partir de la porosité ( $\epsilon$ ) déterminée à "l'état sec", sont stables en régime laminaire, et tout à fait vraisemblables. Les valeurs de  $\epsilon$  ainsi déterminées sont donc toujours valables lorsque le fluide circule dans le tampon, cela signifie qu'il n'y a pas eu, au cours des 90 minutes de circulation, de gonflement de la fibre, même à chaud (voir aussi § 3-3).

### 3-5 - INFLUENCE DE LA VISCOSITE DU BAIN.

=====

Si l'équation de KOZENY-CARMAN est applicable, on doit, lorsqu'on fait varier la viscosité dynamique du fluide (toutes choses restant égales par ailleurs), observer une relation linéaire entre  $Q_V/\Delta p_f$  et  $1/\eta$ , avec des droites passant par l'origine.

A la Fig. 18, (qui est l'homologue de la Fig. 16), nous avons représenté sous forme graphique, les différents couples de valeurs prises par ces deux variables. Les tendances sont les mêmes que celles qu'on pouvait observer avec des fibres de verre.

- Jusqu'à des nombres de Reynolds allant de 6,0 à 12,7, les courbes sont des droites dont le prolongement passe par l'origine. Dans cet intervalle et en-deçà, la relation de KOZENY est donc tout à fait applicable en ce qui concerne la viscosité : proportionnalité inverse entre  $Q_V/\Delta p_f$  et  $\eta$ .
- Ces nombres de Reynolds critiques sont un peu supérieurs à ceux relatifs à l'influence de la porosité et mis en évidence au tableau 8 (voir aussi § 3-4).
- Au-delà de ces seuils, la relation de KOZENY n'est plus directement applicable mais l'influence de la viscosité subsiste, la perméabilité totale étant d'autant plus grande que la viscosité du fluide est faible.

### 3-6 - ESSAI D'APPLICATION DE LA RELATION MIXTE (11).

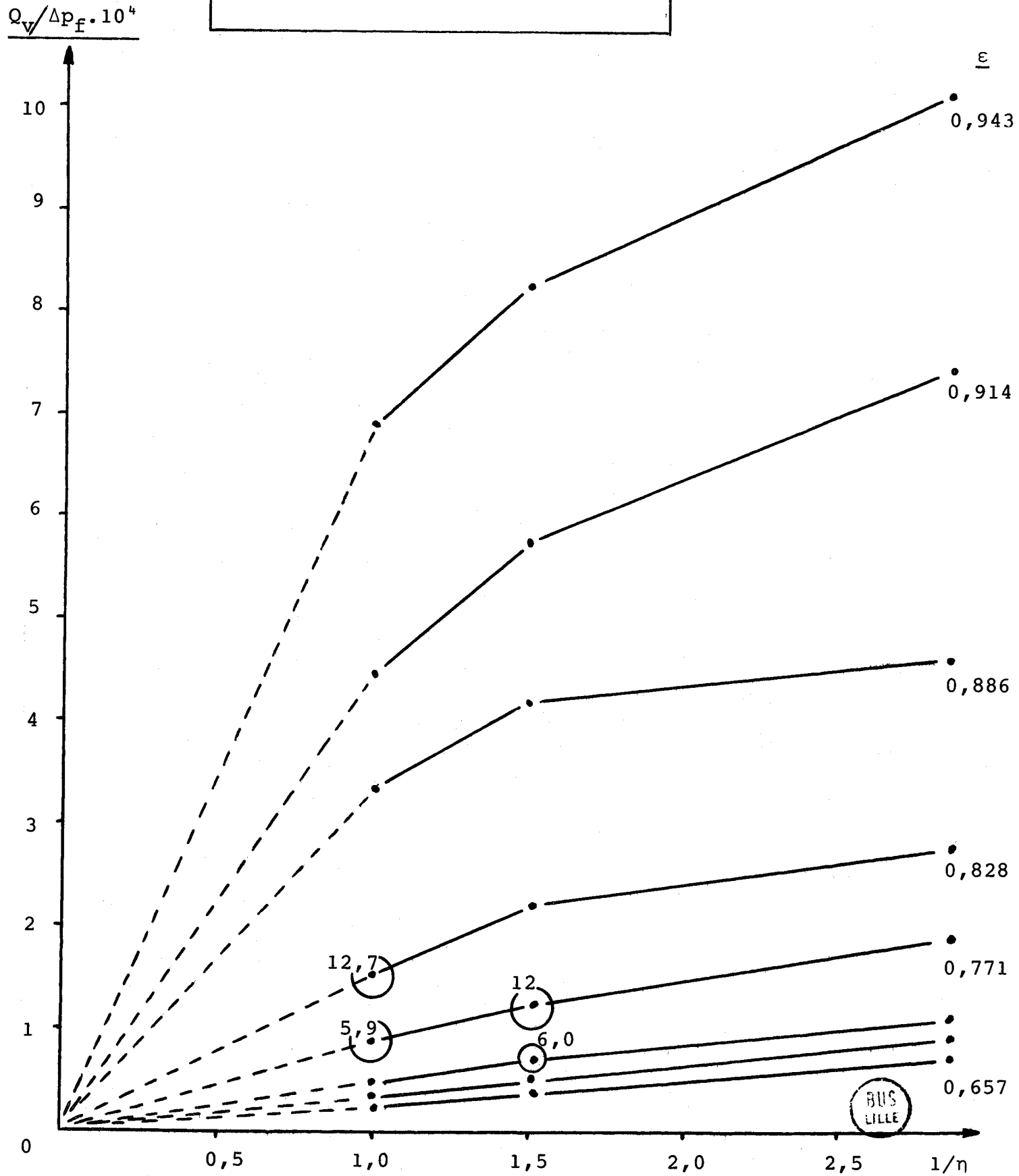
=====

Comme dans le cas des fibres de verre, nous avons essayé de vérifier la validité d'application de la relation (11) comportant 2 expressions, l'une pouvant correspondre à l'écoulement laminaire et

RELATION ENTRE  $Q_v/\Delta p_f$  et  $1/n$

(Fibre de Polyester)

Fig. 18



l'autre à l'écoulement turbulent. Nous avons ainsi déterminé la valeur de la constante  $k_2$  (voir relation 16), en prenant pour  $h_K$  la valeur 5,6 obtenue dans l'interprétation de nos résultats (voir tableau 8). Les paramètres  $S$ ,  $L$  et  $d$  étant constants et connus, la relation 16 devient :

$$k_2 = 1,70 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\Delta p}{Q_V^2} \cdot \frac{\epsilon^3}{\rho (1 - \epsilon)} - 1,60 \cdot 10^{-5} \frac{\eta \cdot (1 - \epsilon)}{Q_V \cdot \rho} \quad (23)$$

les différentes grandeurs étant exprimées en unités C.G.S.

VALEURS DE " $k_2$ " DE LA RELATION 11

POUR LES 3 VISCOSITES ET LES 8 POROSITES

Tableau 9

(Fibre de POLYESTER)

$\epsilon$ $\eta$ (Po)	0,657	0,686	0,714	0,771	0,828	0,886	0,914	0,943
$10^{-2}$	0,9	0,4	0,2	0,4	0,8	0,8	0,9	1,1
$0,66 \cdot 10^{-2}$	0	0	0	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
$0,35 \cdot 10^{-2}$	0	0,2	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7

Une fois de plus, nous constatons que  $k_2$  n'est pas constante et son évolution est systématiquement comparable à celle qui avait été observée lors des essais réalisés sur fibre de verre : Pour les viscosités 0,35 et 0,66 centipoise,  $k_2$  est d'autant plus élevée que la porosité est grande, tandis qu'elle passe par un minimum pour la viscosité 1 centipoise.

Malgré cela et considérant que la seconde expression de la relation (11) pouvait éventuellement être petite à côté de la première, nous avons par le calcul, déterminé  $\Delta p$  à partir des valeurs des autres paramètres, et en appliquant la relation (11) dans laquelle  $h_K$  a été pris égal à 5,6 et  $k_2$  à 0,5 (qui est la moyenne des valeurs rassemblées au tableau 9).

COMPARAISON ENTRE  $\Delta p$  REEL ET  $\Delta p$

Tableau 10

CALCULE A PARTIR DE LA RELATION (11) ( $\Delta p \cdot 10^{-5}$ )

	$\epsilon \rightarrow$	0,657	0,686	0,714	0,771	0,828	0,886	0,914	0,943
$\eta = 10^{-2}$	$\Delta p$ réel	7,60	7,58	7,52	7,33	6,82	5,23	4,53	3,48
	$\Delta p$ calculé	7,50	7,60	7,71	7,49	6,06	4,59	3,21	2,03
$\eta = 66 \cdot 10^{-2}$	$\Delta p$ réel	7,58	7,51	7,42	7,06	6,20	4,82	4,05	3,14
	$\Delta p$ calculé	7,88	7,93	8,24	7,32	6,15	4,32	3,12	1,95
$\eta = 35 \cdot 10^{-2}$	$\Delta p$ réel	7,50	7,34	7,11	6,44	5,72	4,53	3,42	2,73
	$\Delta p$ calculé	8,50	8,09	6,98	6,65	4,91	3,33	2,90	1,85

Etant donné la divergence importante existant entre les valeurs réelles et les valeurs calculées, on est bien obligé d'admettre qu'une relation du type (11) n'est pas applicable dans notre cas.



Chapitre IV

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ÉCOULEMENT A TRAVERS UN  
TAMPON DE FIBRES DE LIN

Nous abordons à présent un domaine plus complexe puisqu'il s'agit d'une fibre qui doit avoir, vis-à-vis du fluide d'écoulement, un certain nombre de réactions parmi lesquelles il faut citer :

- gonflement de la fibre ;
- passage en solution d'une partie des constituants non-cellulosiques.

Le premier comportement doit entraîner une diminution de la porosité et conséquemment, une réduction de la perméabilité.

Le second comportement a 2 effets contraires : l'élimination du tampon fibreux, d'une partie des substances non-cellulosiques devrait laisser entre les fibres, plus d'interstices et de ce fait, occasionner une augmentation de la perméabilité ; mais le passage en solution de ces substances, va augmenter la viscosité du bain, d'où il résulte, une diminution de la perméabilité.

Nous essayerons d'étudier séparément ces différents phénomènes en vue de définir leurs influences respectives.

4-1 - INSTALLATION EXPERIMENTALE ET ECHANTILLONNAGE.  
=====

- a) Le montage expérimental (y compris la cellule de mesure) est celui qui a précédemment servi aux travaux réalisés sur fibre de verre (voir Ch. 2 - § 2-2 et § 2-3).
- b) On a expérimenté 2 types de fibres de lin ayant subi les opérations industrielles suivantes :

Peignage - Doublage - Préparation sur 4 passages d'étirage - Banc-à-Broches.

La fibre est présentée non pas sous forme de mèche, mais en BOURRE.

- l'une des matières est un lin cultivé en 1976, insuffisamment roui mais ayant quand même tendance à se diviser.
- l'autre est un lin cultivé en 1975, normalement roui et se divisant un peu plus que le précédent.

Les deux caractéristiques essentielles de la fibre qu'il importe de connaître sont sa masse volumique ( $\rho_f$ ) et sa surface spécifique ( $\sigma$ ). En raison de la structure fibreuse particulière du lin, ces deux paramètres sont assez difficiles à déterminer. Nous montrons ci-après, au § 4-3, comment nous les avons estimés avec la meilleure exactitude possible.

Avant d'aborder l'étude des phénomènes d'écoulement à travers le tampon fibreux de lin, il paraît nécessaire de fournir quelques précisions sur la structure fibreuse de ce textile, afin de mieux comprendre les difficultés rencontrées lors de la mesure de certaines caractéristiques.

#### 4-2 - STRUCTURE FIBREUSE PARTICULIERE DU LIN.

=====

Le lin est une fibre composée qui constitue la majeure partie du liber de la plante de même nom.

Les fibres élémentaires du lin, constituées de cellulose pratiquement pure, dont la longueur moyenne est comprise entre 2 et 3 cm (17) et dont la finesse (ou "diamètre") est de l'ordre de 15 microns, sont dans la tige, groupées en faisceaux comme le montre la Fig. 19. En plan de coupe transversale (Fig. 19), le faisceau contient 10 à 40 fibres, mais en réalité, il en comporte plusieurs centaines car les fibres élémentaires sont décalées les unes par rapport aux autres dans le sens longitudinal (Fig. 19 bis) de manière à fournir au faisceau, une longueur de 12 à 18 cm (18)

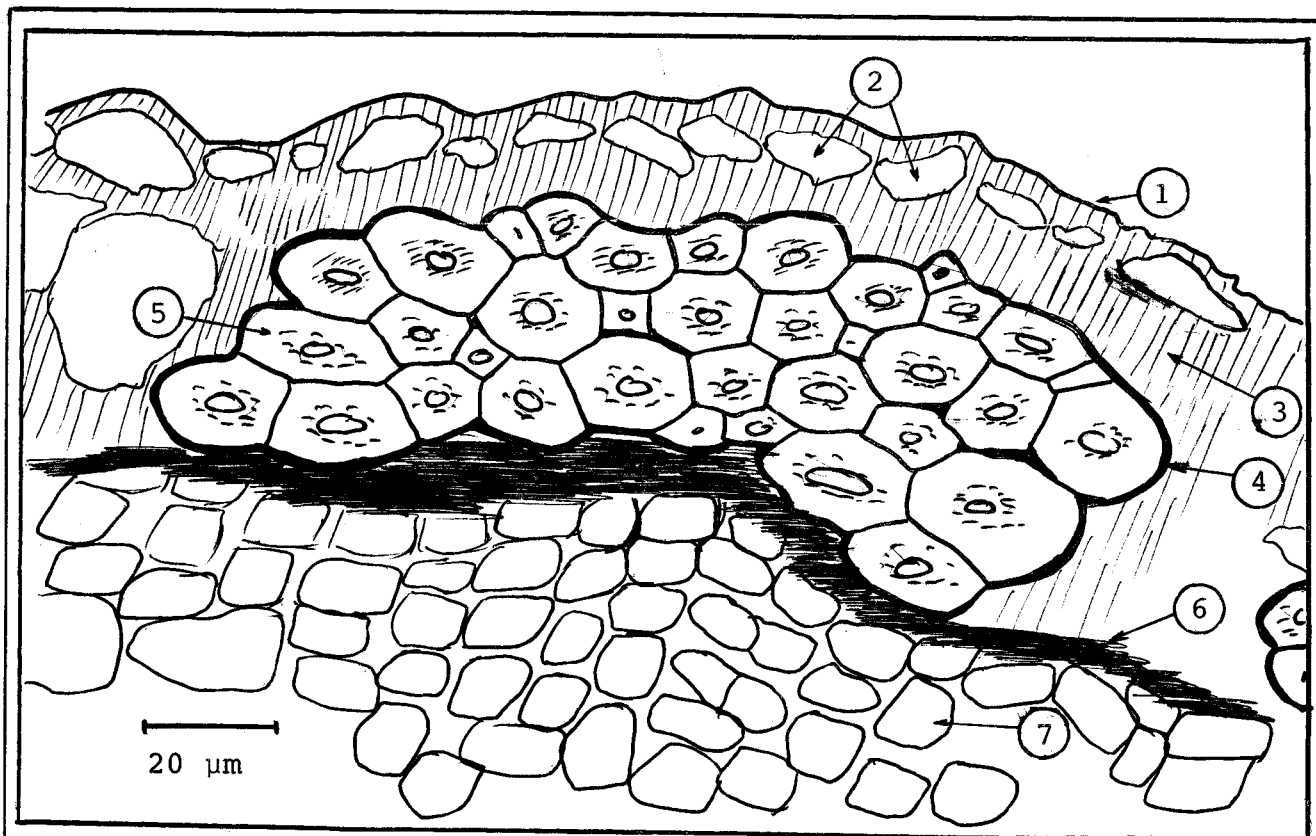


Fig. 19 - FAISCEAU DE LIN DANS UNE TIGE NON ROUIE

- 1 - Cuticule
- 2 - Epiderme
- 3 - Parenchyme cortical
- 4 - Faisceau fibreux
- 5 - Fibre élémentaire
- 6 - Cambium
- 7 - Bois

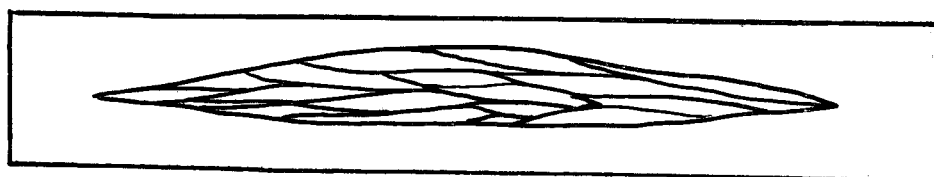


Fig. 19 bis - Représentation schématique des Fibres élémentaires dans le faisceau  
(épaisseur des fibres volontairement amplifiée)



Dans la tige, les faisceaux ne sont pas totalement indépendants (18). Par ailleurs, après élimination du tronc ligneux central (c'est-à-dire après l'opération de teillage), ils peuvent encore être assemblés par l'épiderme et le parenchyme cortical.

Au cours des opérations mécaniques du teillage, du peignage et de la préparation, les faisceaux se séparent et se clivent partiellement et très différemment selon le processus mis en oeuvre, selon le degré de rouissage de la plante (19), selon l'année de récolte, (plus exactement selon les conditions climatiques). Il en résulte que, selon la fabrication et selon le stade où on le prélève, l'élément fibreux peut être plusieurs faisceaux accolés, un faisceau, une fraction de faisceau, ou encore mais beaucoup plus rarement la fibre élémentaire (voir Fig. 20). En réalité, l'élément fibreux est toujours plus ou moins ramifié (voir Fig. 21) de sorte que si on l'examine en coupe transversale à différents niveaux, les clichés obtenus ne sont pas les mêmes et la finesse constatée est généralement surfaite, car on observe des fibres élémentaires isolées qui sont en fait, encore adhérentes au faisceau quelques millimètres plus loin.

4-3 - DETERMINATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE MOYENNE DE L'ELEMENT  
=====

FIBREUX DE LIN.  
=====

a) Généralités.

- La détermination de la finesse du lin par voie optique n'est pratiquement pas possible, d'une part parce que l'élément fibreux n'est pas cylindrique et a une section très variable, d'autre part parce qu'en raison de l'état ramifié, la présentation est différente selon le niveau d'examen, et il faudrait alors multiplier le nombre d'observations pour parvenir à un résultat moyen suffisamment précis.

- La détermination de la masse linéique est également très critiquable pour 3 raisons : 1) l'état ramifié conduit à observer d'autant plus de fibres que la longueur de coupe est plus petite, ce qui se traduit par une finesse (apparente) meilleure ; 2) pour une même longueur de coupe et une même finesse réelle, un lin fortement ramifié apparaîtra plus fin qu'un autre qui l'est moins ; 3) l'irrégularité du lin

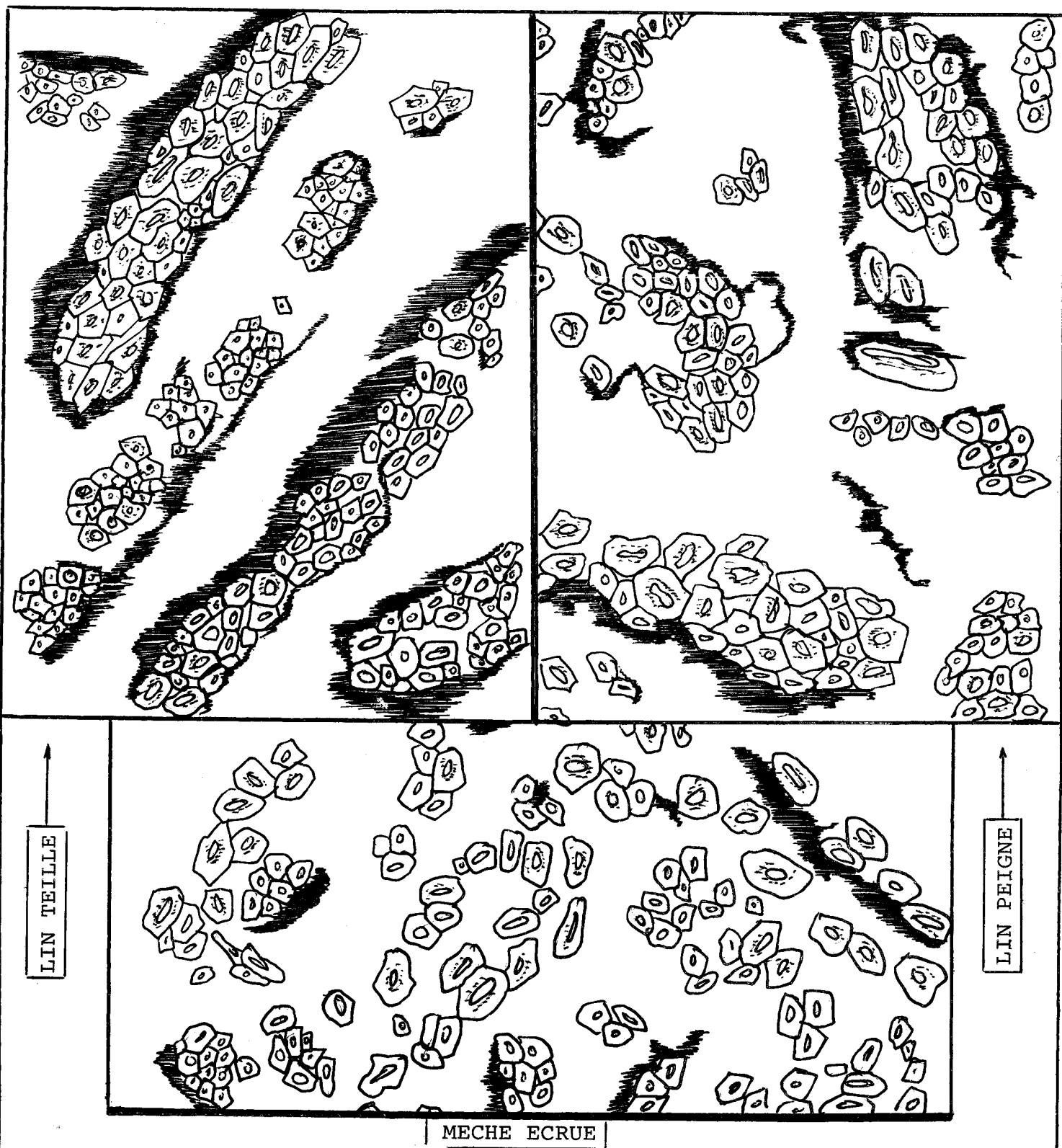


Fig. 20 - ASPECT EN COUPE TRANSVERSALE D'ELEMENTS FIBREUX DE LIN A DIFFERENTS STADES DE LA TRANSFORMATION.

SUS  
LILLE

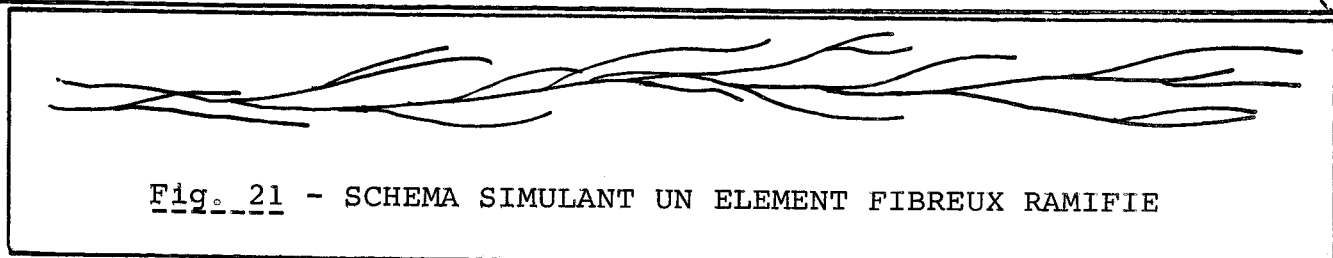


Fig. 21 - SCHEMA SIMULANT UN ELEMENT FIBREUX RAMIFIE

nécessite un nombre de mesures considérable, alors que l'analyse est déjà par elle-même, longue et délicate.

- C'est la raison pour laquelle il est préférable d'avoir recours à une méthode indirecte, en l'occurrence, la perméamétrie.

b) Méthodes perméamétriques actuellement recommandées pour la détermination de la finesse du lin.

Il existe en France deux méthodes normalisées (21)

1) La première dite "méthode de référence à deux compressions" découle des nombreux travaux réalisés par le laboratoire DE MEULEMEESTER à Gand (22 à 24). Le tampon fibreux est cylindrique et les fibres sont disposées parallèlement à son axe. La même masse de fibres est expérimentée successivement dans deux manchons de diamètres différents ce qui fournit 2 porosités. Le débit d'air traversant la masse poreuse est de l'ordre de  $1,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , ce qui permet de considérer indubitablement que l'écoulement est laminaire. L'application de la relation de KOZENY-CARMAN conduit à 2 équations à 2 inconnues, d'où l'on tire la valeur de la masse volumique  $\rho_f$  de l'élément fibreux et celle d'un paramètre A' directement proportionnel à sa surface spécifique  $\sigma$ .

A l'actif de cette méthode, il faut noter son originalité, le fait que l'écoulement est laminaire et la relation de KOZENY directement applicable, et enfin la mesure sous deux porosités ce qui donne la possibilité d'estimer non seulement la finesse des fibres, mais aussi leur masse volumique. En laine, on considère la masse volumique constante, et la méthode actuellement normalisée (25) fournit un indice de finesse d'où l'on peut tirer le diamètre en microns, moyennant un étalonnage préalable de l'appareil.

En revanche, il est possible de formuler à l'égard de la méthode à deux compressions, un certain nombre de critiques parmi lesquelles la plus importante nous paraît être le manque d'homogénéité de porosité du tampon fibreux. Celui-ci est en effet, constitué de deux parties juxtaposées que l'on retrouve très nettement après mesure. Mais l'hétérogénéité de porosité se produit surtout lors du transfert du tampon fibreux du premier manchon de diamètre 10 mm, dans le second de diamètre 11 mm. Il est alors nécessaire pour régulariser la disposition des

fibres, de recourir à une opération manuelle dite "d'ouvraison" dont l'efficacité dépend essentiellement de l'opérateur. Il semble que cette difficulté soit surtout due au fait que les fibres sont disposées parallèlement à l'axe du manchon. De tels ennuis avaient été rencontrés par ANDERSON et WARBURTON (26) lors de recherches effectuées sur fibre de laine, et ces auteurs avaient alors adopté des tampons constitués de fibres disposées au hasard.

2) La seconde méthode dite "simplifiée et à une compression" dérive de la technique couramment utilisée en laine. Le tampon est constitué par une masse donnée de fibres disposées au hasard dans un espace cylindrique de volume connu. Le débit d'air traversant le tampon fibreux est 15 l/min, soit  $250 \text{ cm}^3/\text{s}$ , ce qui écarte l'hypothèse d'un écoulement laminaire. La finesse moyenne de l'élément fibreux est estimée par la dénivellation du liquide manométrique ( $\Delta h$ ) que l'on peut traduire en un indice (Indice de Finesse Standard) moyennant l'étalonnage de l'appareil à l'aide de lots de référence.

Cette méthode ne pouvait nous convenir puisqu'elle ne permet pas de déterminer valablement la surface spécifique, la relation de KOZENY étant inapplicable.

### c) Cas de notre expérimentation.

Nous avons écarté les inconvénients de la méthode présentée en (b1) en travaillant sur fibres disposées au hasard dans la cellule de mesure décrite au §2-3. Cette cellule présente sur celle utilisée dans la méthode décrite en (b2), l'avantage d'avoir un volume bien plus important ( $50,4 \text{ cm}^3$  au lieu de  $4,4 \text{ cm}^3$ ) et des dimensions mieux équilibrées (voir Fig. 7 et § 2-3) réduisant ainsi le risque de formation de passages préférentiels tout en permettant l'utilisation d'un manomètre simple (tube incliné) malgré le choix d'un débit relativement faible.

Nous avons retenu une technique basée sur la relation de KOZENY-CARMAN, dont la théorie est présentée en annexe 4, et qui permet d'obtenir simultanément, la valeur de la surface spécifique de l'élément fibreux et celle de sa masse volumique.

Pour les 2 types de matière, on a expérimenté 9 tampons fibreux de masses comprises entre 6 g et 22 g. Cela correspond à des porosités généralement comprises entre 0,9 et 0,7. Les masses exactes et les porosités réelles des différents tampons sont groupées au tableau 11.

Bien qu'il soit courant d'utiliser l'air comme fluide de circulation, nous nous sommes servis d'hélium, d'une part parce que nous disposions d'une bouteille munie d'un détendeur bi-étagé permettant un réglage de débit très stable dans le temps, d'autre part, pour obtenir un nombre de Reynolds le plus petit possible (voir relation a14), la masse volumique de l'hélium étant 7 fois plus petite que celle de l'air ( $0,179.10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup> contre  $1,293.10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>) pour une viscosité à 20°C peu différente ( $1,95.10^{-4}$  Po contre  $1,81.10^{-4}$  Po).

Nous avons adopté le débit le plus petit possible compatible avec le débitmètre que nous possédions et que nous avons préalablement soumis à un étalonnage rigoureux dans les conditions de travail (fluide et température). Ce débit a été 40 cm<sup>3</sup>/s.

Le dispositif expérimental complet est schématisé à la Fig. 22.

#### d) Résultats.

Pour chacune des deux matières, nous avons rassemblé au tableau 11, les masses (m) et les porosités ( $\epsilon$ ) des 9 tampons fibreux, ainsi que la valeur de l'expression désormais bien connue  $\frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2}$ .

Sur chaque tampon, nous avons effectué 3 mesures de perte de charge, en ayant soin entre chaque mesure, de sortir de la cellule toute la masse de fibres, de l'ouvrir et de la redisposer au hasard. Les valeurs figurant au tableau 11, sont des  $\Delta p_f$  moyens (perte de charge relative au tampon fibreux seul), et les coefficients de variation inter-répétitions (C.V. %) montrent que la dispersion est faible (C.V. moyen = 2,8 %).

RESULTATS DES MESURES RELATIVES A LA DETERMINATION  
DE LA SURFACE SPECIFIQUE DE L'ELEMENT FIBREUX DE LIN

Tableau 11

m (g)	ε (*)	1 - ε	$\frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2}$	$\Delta p_f$		$\frac{Q_v \cdot 10^3}{\Delta p_f}$	$\left(\frac{m^2}{R}\right)^{1/3}$	Re
				(baryes. 10 <sup>3</sup> )	C.V. %			
6,26	0,907	0,093	86,2	0,400	3,7	100	1,575	1,25
8,08	0,880	0,120	47,2	0,728	3,1	55	1,53	0,97
10,12	0,849	0,151	26,9	1,29	2,8	31,0	1,47	0,77
12,13	0,819	0,181	16,8	2,03	2,4	19,65	1,425	0,65
14,20	0,788	0,212	10,9	3,14	3,4	12,75	1,37	0,55
16,05	0,761	0,239	7,72	4,43	2,5	9,02	1,325	0,49
18,19	0,729	0,271	5,28	6,55	1,7	6,11	1,265	0,43
20,15	0,700	0,300	3,82	9,04	3,7	4,42	1,215	0,39
22,12	0,670	0,330	2,77	12,35	3,6	3,24	1,165	0,35
6,21	0,914	0,086	103	0,402	4,0	99,5	1,565	1,24
7,89	0,890	0,110	58,3	0,708	2,2	56,5	1,52	0,96
9,99	0,862	0,138	33,6	1,26	1,8	31,8	1,47	0,77
12,08	0,833	0,167	20,8	2,01	4,0	19,85	1,425	0,64
14,26	0,802	0,198	13,15	3,10	3,2	12,9	1,38	0,54
16,13	0,776	0,224	9,30	4,42	1,2	9,05	1,33	0,47
18,12	0,749	0,251	6,68	6,27	1,8	6,38	1,28	0,42
20,07	0,721	0,279	4,80	8,65	1,7	4,62	1,23	0,38
22,08	0,694	0,306	3,58	11,75	3,6	3,41	1,185	0,35

(\*) Les porosités ont été calculées en tenant compte des valeurs réelles obtenues de masse volumique : 1,33 g/cm<sup>3</sup> pour le lin de 1976 et 1,43 g/cm<sup>3</sup> pour celui de 1975.



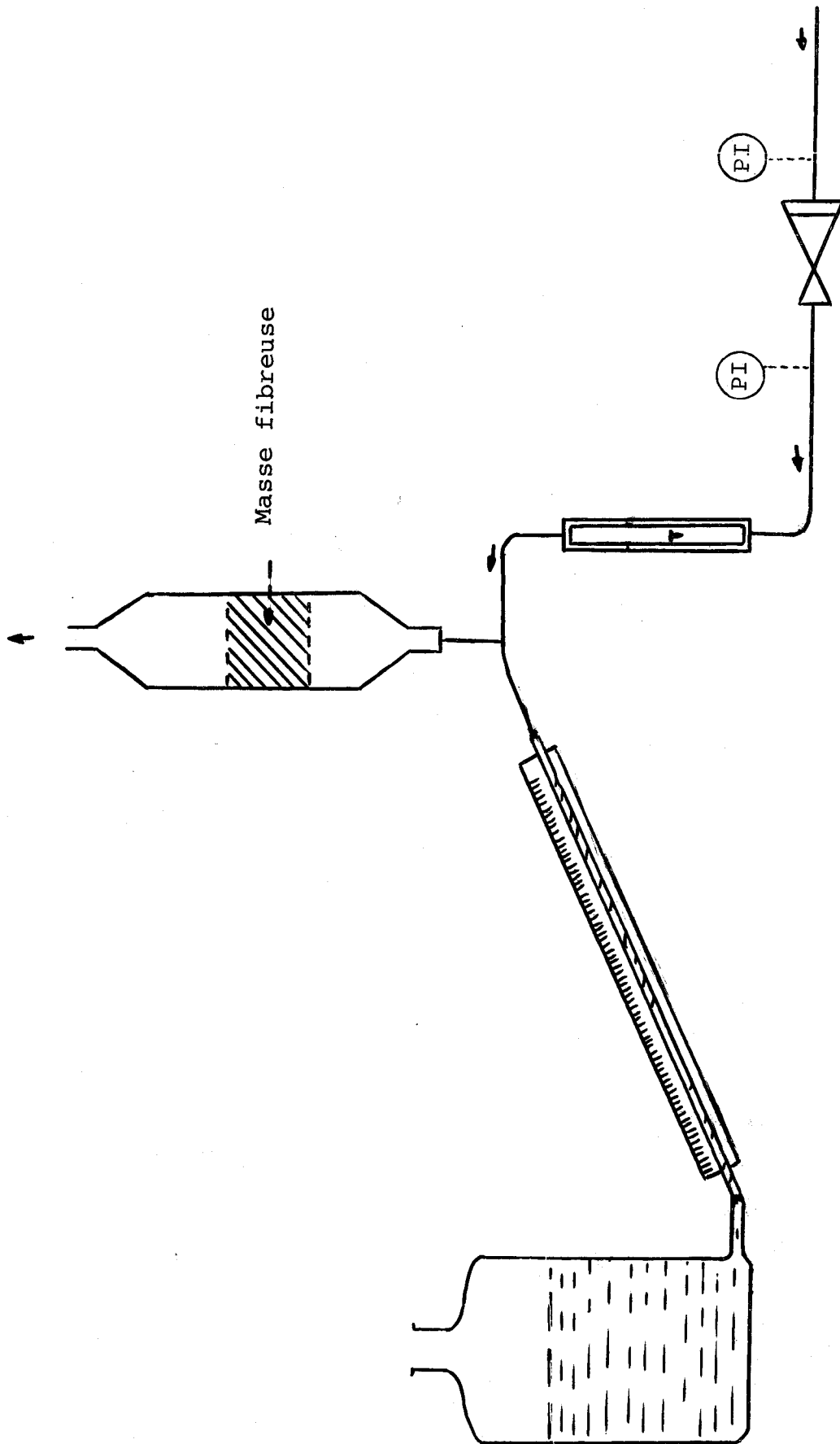


Fig. 22 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR LA DETERMINATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE DU LIN



Nous avons appliqué la théorie décrite en Annexe 4, en calculant la régression de  $\left(\frac{m^2}{R}\right)^{1/3}$  sur m. (voir Fig. 23 et 24).

Les coefficients de corrélation statistique sont excellents :

$$r = - 0,9999 \text{ pour le lin de 1976}$$

$$r = - 0,9996 \text{ pour le lin de 1975}$$

Les droites de régression ont pour équations :

$$\text{- matière 1976 - } y = - 0,0259 x + 1,737$$

$$\text{- matière 1975 - } y = - 0,0238 x + 1,712$$

1) Calcul de la masse volumique de l'élément fibreux (relation a21)

$$\text{Lin 1976 - } \rho_f = \frac{b}{a \cdot V_t} = \frac{1,737}{0,0259 \times 50,4} = \underline{1,33 \text{ g/cm}^3}$$

$$\text{Lin 1975 - } \rho_f = \frac{b}{a \cdot V_t} = \frac{1,712}{0,0238 \times 50,4} = \underline{1,43 \text{ g/cm}^3}$$

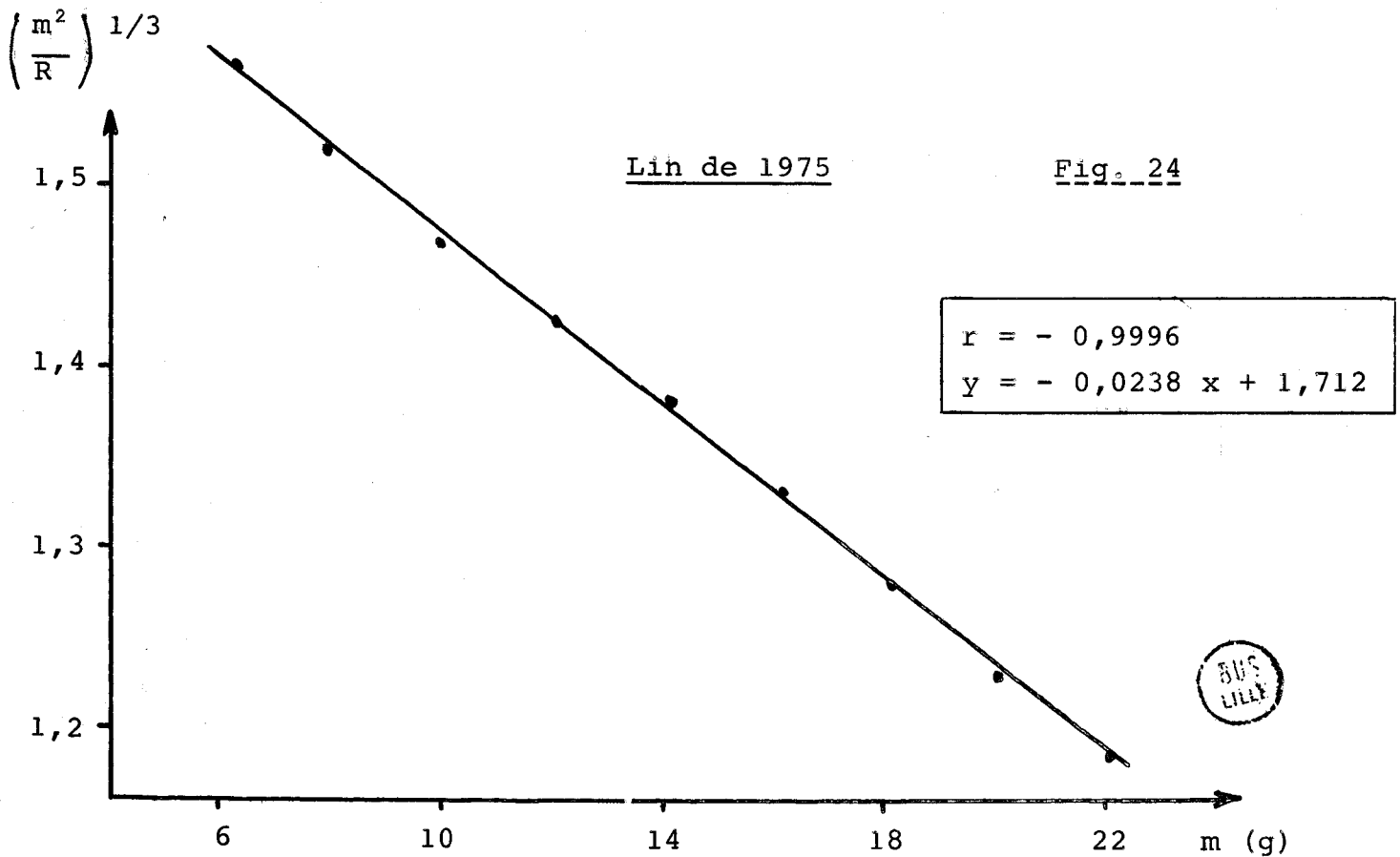
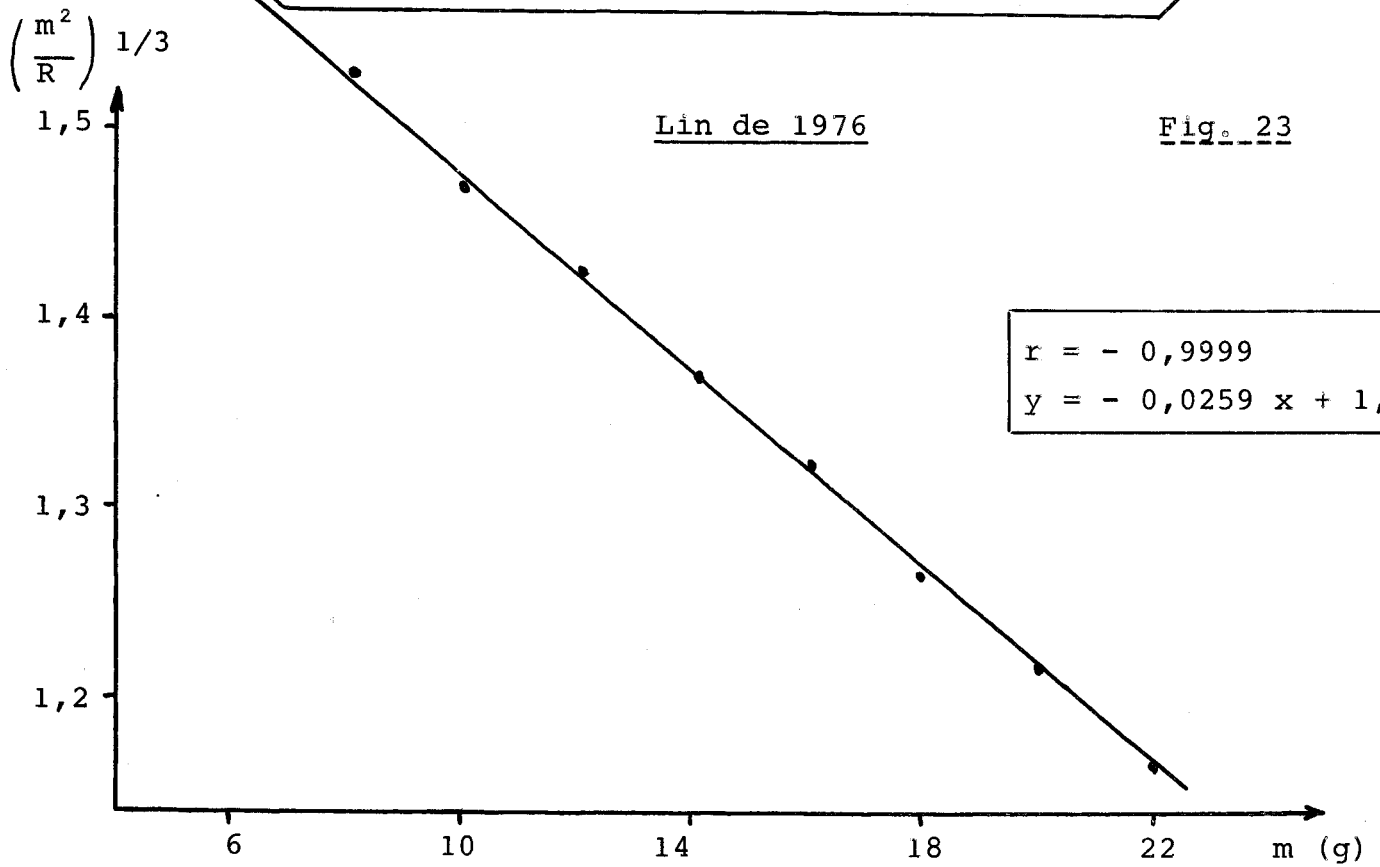
Les auteurs cités en références (22 à 24) avaient obtenu des valeurs encadrant ces résultats (1,25 à 1,45) en expérimentant des lins rouis teillés et des lins rouis peignés à plusieurs intensités de peignage.

A cet effet, il faut préciser que la masse volumique de l'élément fibreux de lin est tributaire des facteurs suivants :

- le stade de transformation (19). Plus l'élément fibreux a subi l'effet des processus mécaniques de la fabrication, plus les tissus non-cellulosiques lâches et peu adhérents ont été éliminés (comparer l'état teillé et la mèche écru présentés schématiquement à la Fig. 20).
- le degré de rouissage (19). Durant cette opération, les tissus non-cellulosiques avoisinant les faisceaux fibreux dans la plante



REGRESSION DE  $\left(\frac{m^2}{R}\right)^{1/3}$  SUR "m" POUR LA DETERMINATION  
DE LA SURFACE SPECIFIQUE DE L'ELEMENT FIBREUX



sont plus ou moins transformés et solubilisés par les enzymes secrétées par les microorganismes qui prolifèrent sous l'effet de l'humidité et de la température. Il en résulte que l'élément fibreux de lin normalement roui, est plus riche en cellulose que l'élément fibreux de lin non roui ou partiellement roui.

- la constitution interne de la fibre élémentaire (27). Lorsque la végétation a été normale, le lumen est réduit, la fibre est dense et de bonne qualité (voir Fig. 25-a). Lorsque la croissance de la plante a été retardée ou perturbée, par exemple par effet de verse, la fibre élémentaire a un lumen de dimension relative-ment grande ; elle est creuse et de qualité médiocre (voir Fig. 25-b).

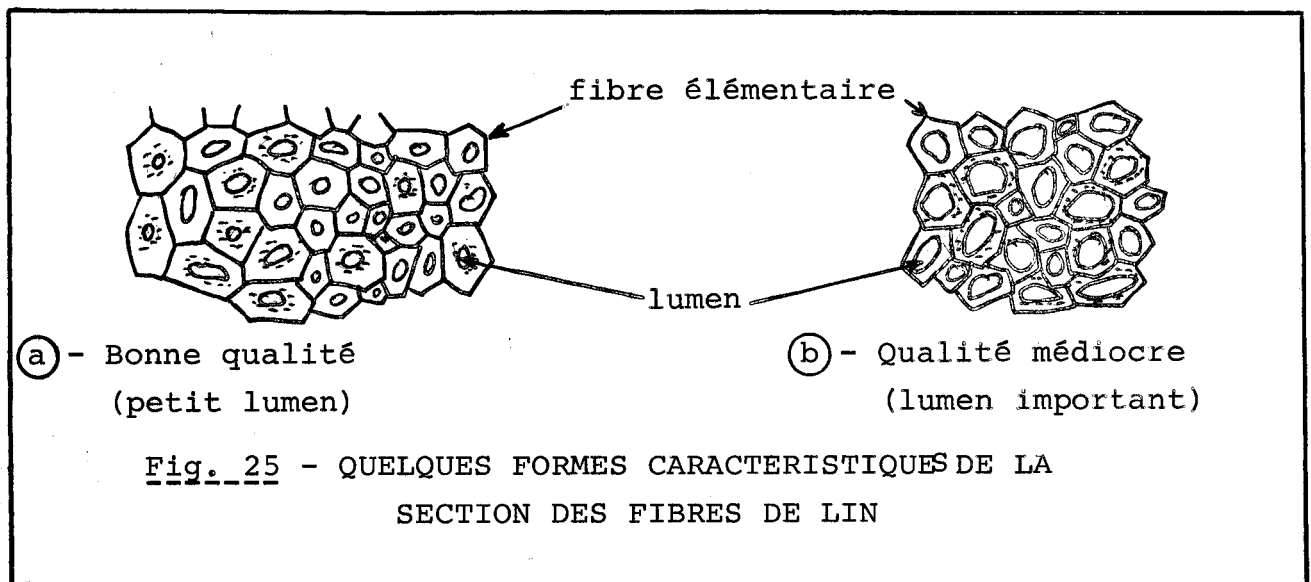


Fig. 25 - QUELQUES FORMES CARACTERISTIQUES DE LA SECTION DES FIBRES DE LIN

L'aspect en coupe transversale de nos échantillons, laisse apparaître des fibres élémentaires à lumen assez réduit : identique à celui de la Fig. 25-a pour le lin de 1975 et légèrement plus grand pour le lin de 1976. Ces deux matières ont été bien élaborées mécaniquement puisqu'elles ont subi tout le processus de préparation. Par contre, le lin de 1976 est chimiquement moins épuré que celui de 1975 en raison du rouissage incomplet (teneur en substances non-cellulosiques 34 % pour le premier et 28 % pour le second).

Dans ces conditions, les valeurs de masse volumique 1,33 g/cm<sup>3</sup> et 1,43 g/cm<sup>3</sup> apparaissent comme tout à fait vraisemblables (celle de la cellulose étant 1,51 g/cm<sup>3</sup>).

2) Calcul de la surface spécifique de l'élément fibreux (relation a22)

Lin 1976 -

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{a^3 \cdot \eta \cdot h_K \cdot L^2 \cdot \rho_f}} = \sqrt{\frac{1}{(0,0259)^3 \cdot 1,95 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 4,02^2 \cdot 1,33}} = 1,51 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

Lin 1975 -

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{a^3 \cdot \eta \cdot h_K \cdot L^2 \cdot \rho_f}} = \sqrt{\frac{1}{(0,0238)^3 \cdot 1,95 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 4,02^2 \cdot 1,43}} = 1,66 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

Remarques.

- Dans l'application de la relation (a22), nous avons adopté pour la constante de KOZENY ( $h_K$ ), la valeur 6, ayant obtenu pour des constitutions de tampons fibreux similaires en fibres de verre et fibres de polyester, des valeurs minimales comprises entre 5,5 et 6,1.
- A priori, les valeurs  $1,51 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$  et  $1,66 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$  peuvent paraître assez élevées pour des éléments fibreux de lin ; nous essayerons ci-après, de les justifier.

Depuis 1971, les récoltes annuelles de lin sont systématiquement étudiées par l'Institut Textile de France, en vue d'en définir la qualité. En ce qui concerne les dimensions de la fibre élémentaire, les "diamètres" moyens suivants ont été observés (28 et 29) :

Année 1971	-	d	=	14,2	µm	±	0,8	(*)
"	1972	-	d	=	12,9	"	±	0,6
"	1973	-	d	=	14,2	"	±	0,6
"	1974	-	d	=	12,0	"	±	0,4

) intervalle de confiance à 95 % de certitude, compte tenu de l'écart-type et du nombre de mesures.

Année 1975 -  $d = 12,8 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,5$   
" 1976 -  $d = 10,3 \text{ " } \pm 0,4$

Exprimés en surface spécifique ( $\sigma = \frac{4}{d}$ ), ces résultats deviennent :

$$\text{Année 1975 - } \sigma = 3,13 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

$$\text{Année 1976 - } \sigma = 3,88 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

L'examen en coupe transversale de nos deux types d'échantillons expérimentaux, montre qu'en moyenne les éléments fibreux sont constitués de : 6 fibres élémentaires pour la matière 1976, entre 3 et 4 fibres élémentaires pour la matière 1975.

Bien entendu, l'élément fibreux moyen réel doit être considéré comme plus grossier, car en coupe transversale, on examine l'état ramifié à un niveau donné. Or, en perméamétrie, on observe aussi l'état ramifié, plus exactement, l'état ramifié moyen, c'est-à-dire ce que les praticiens de la filature appellent la "finesse apparente".

Dans ces conditions, les surfaces spécifiques calculées des éléments fibreux seraient :

- Echantillon 1976, pour 6 fibres élémentaires :

$$\sigma = \frac{3,88 \cdot 10^3}{\sqrt{6}} = 1,58 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

(valeur obtenue  $1,51 \cdot 10^3$ )

- Echantillon 1975,

$$\text{en considérant 3 fibres : } \sigma = \frac{3,13 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 1,81 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

$$\text{en considérant 4 fibres : } \sigma = \frac{3,13 \cdot 10^3}{\sqrt{4}} = 1,56 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

(valeur obtenue  $1,66 \cdot 10^3$ )

Il y a donc tout lieu d'admettre la vraisemblance de nos résultats.

4-4 - INFLUENCE DE LA POROSITE - VERIFICATION DE LA VALIDITE  
DE LA RELATION DE KOZENY-CARMAN.

Nous avons repris le raisonnement développé au § 2-11, à savoir qu'on doit, lorsque l'équation de KOZENY est applicable, observer une relation linéaire entre  $\frac{Q_v}{\Delta P_f}$  et  $\frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2}$ . Aux fig. 26 et 27, nous avons reporté les couples correspondant aux valeurs prises par ces 2 variables, pour les 9 tampons fibreux expérimentés et les 2 types de matière. On peut alors constater un alignement impeccable des points représentatifs. A titre indicatif, les coefficients de corrélation sont  $r = 0,9999$  pour la matière 1976 et  $r = 0,9996$  pour la matière 1975.

Il est donc indéniable que dans notre cas, la relation de KOZENY est parfaitement applicable en ce qui concerne l'influence de la porosité. Il est vrai que les Nombres de Reynolds sont petits et compris entre 0,35 et 1,25 (voir tableau 11). Ceci est extrêmement encourageant et confirme la validité de la technique expérimentale décrite au § 4-3, pour la détermination de la surface spécifique.

4-5 - EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE EN FONCTION DU DEBIT.

DOMAINE DE VALIDITE DE LA LOI DE DARCY.  
=====

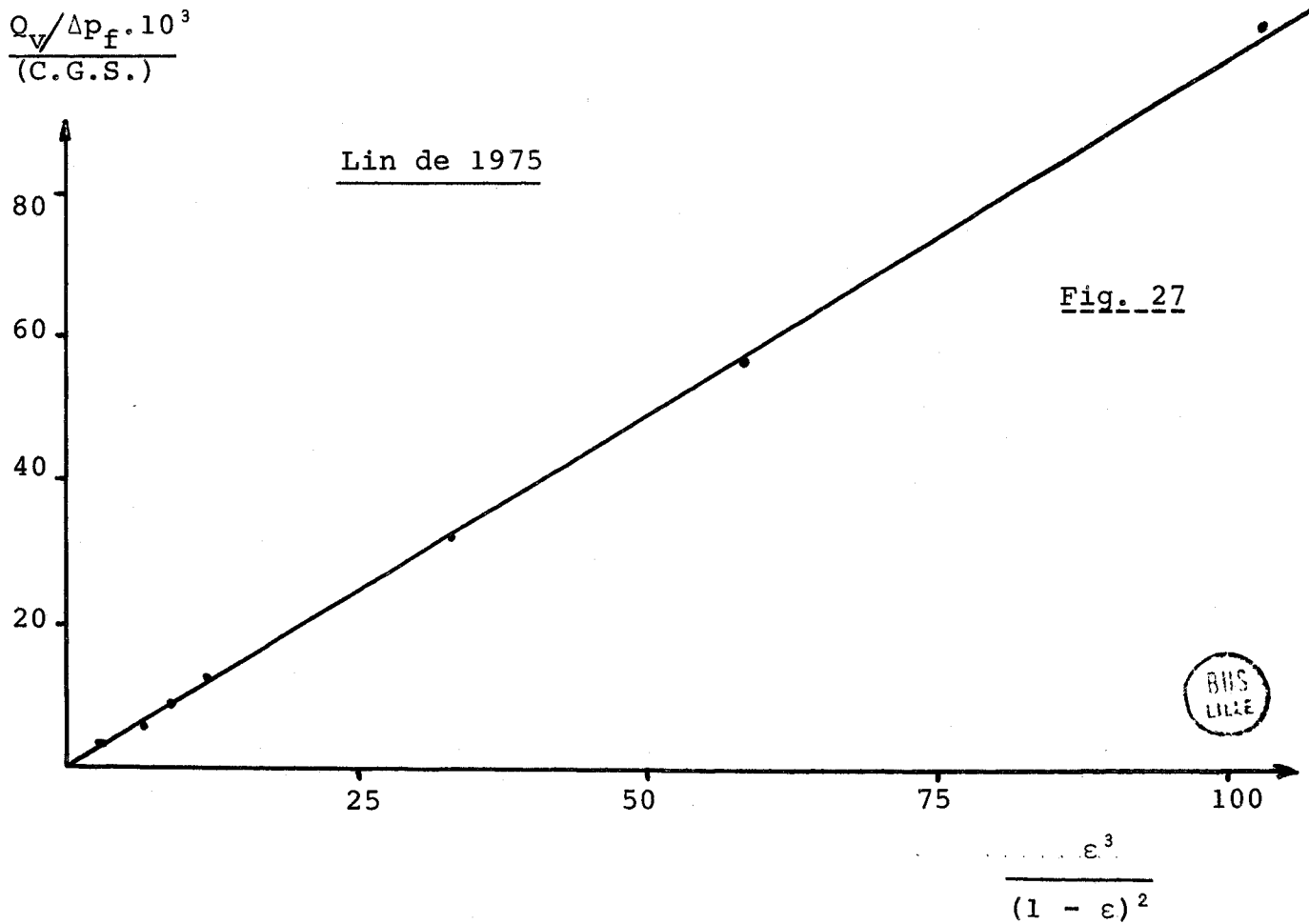
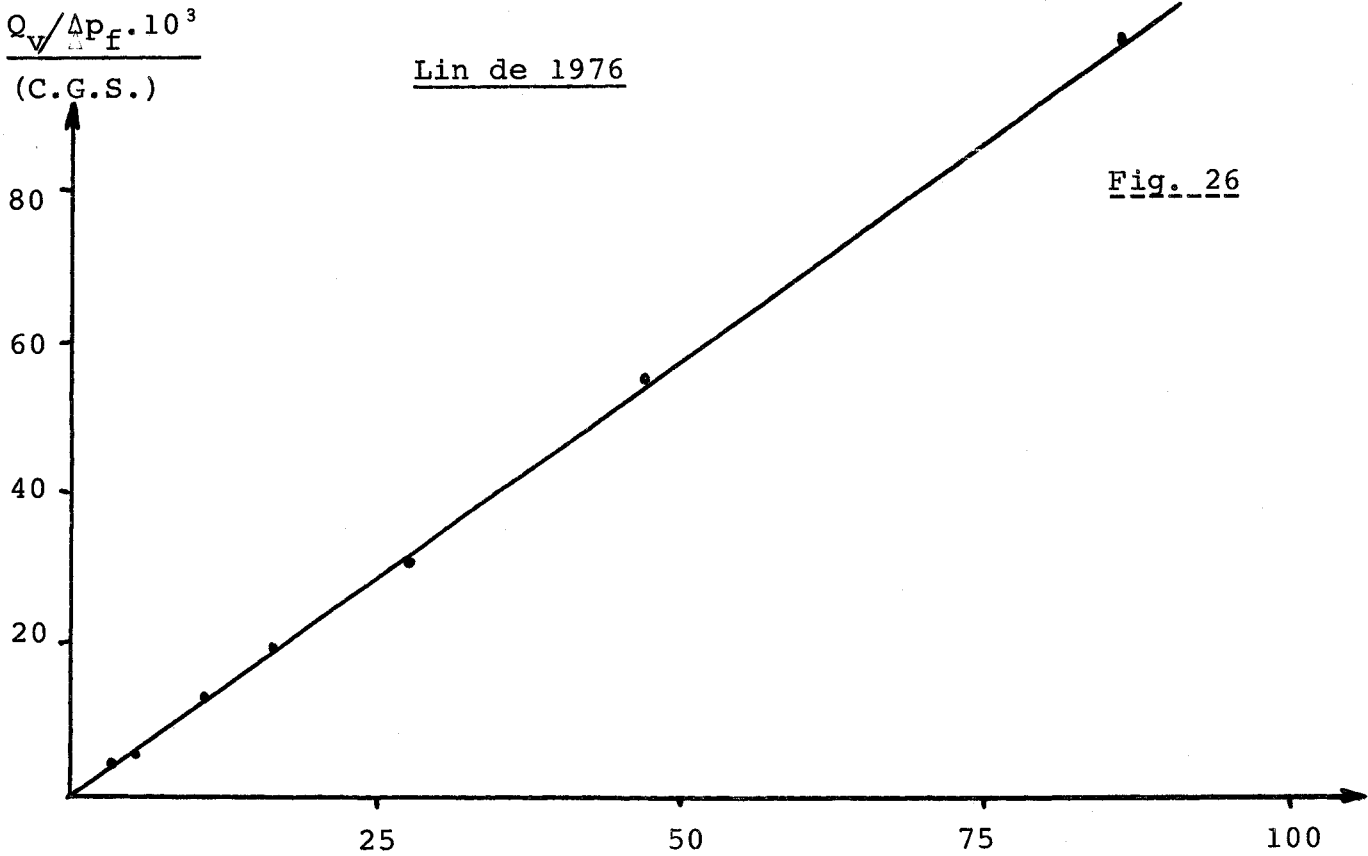
Pour les 2 types de matière et pour 5 des 9 tampons fibreux correspondant à des porosités comprises entre 0,700 et 0,914, on a réalisé des écoulements d'hélium à 5 débits volumiques allant de 40 à 113 cm<sup>3</sup>/s, en vue de vérifier la validité de la loi de DARCY ( $\Delta p = k \cdot Q_v$ ).

Les résultats sont groupés au tableau 12 et représentés aux Fig. 28 et 29 où nous avons également porté quelques valeurs de Nombre de Reynolds calculées selon la relation a14.

D'une façon générale, on observe un alignement rigoureux des points représentatifs lorsque le nombre de Reynolds est faible et inférieur à une certaine valeur ; au-delà, les courbes passant

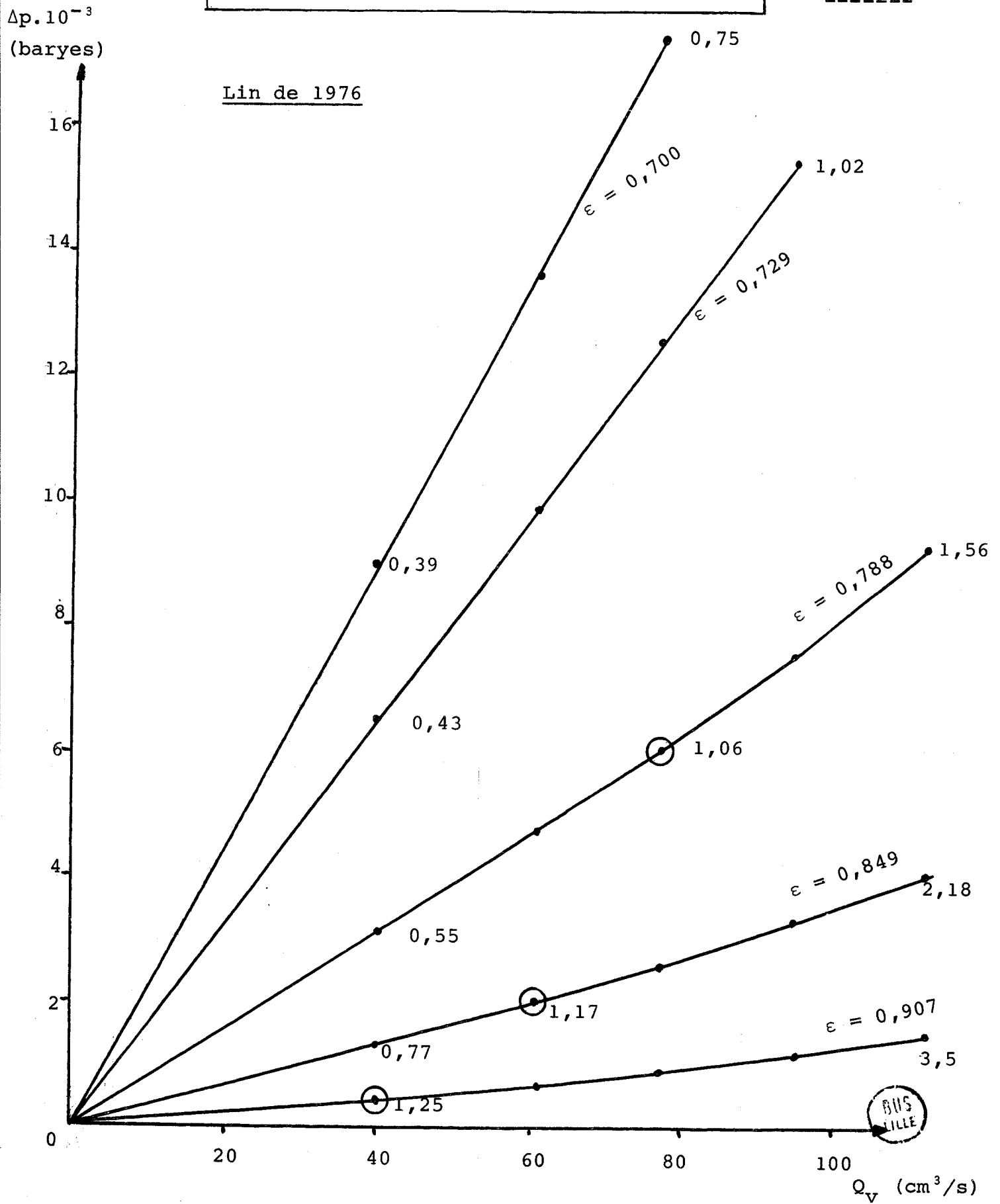
RELATION ENTRE  $\frac{Q_v}{\Delta p}$  ET  $\frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2}$

Fluide : Hélium



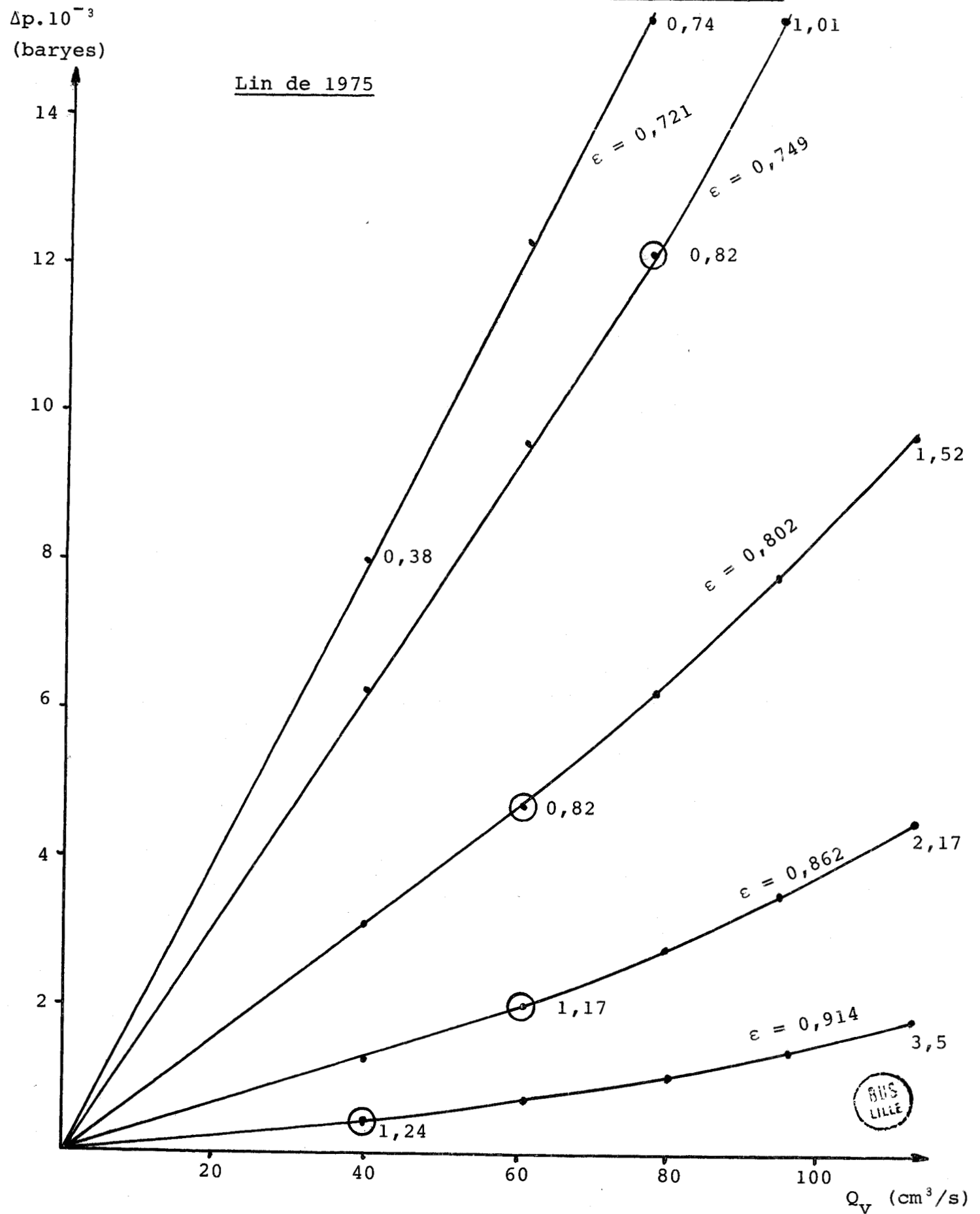
RELATION  $\Delta p = f(Q_V)$  POUR DIFFERENTES  
POROSITES

Fig. 28



RELATION  $\Delta p = f(Q_v)$  POUR DIFFERENTES  
POROSITES

Fig. 29





par les points représentatifs sont arquées avec concavité vers le haut. Les Nombres de Reynolds critiques correspondant à ces changements de pente sont les suivants :

Matière 1976 - 1,02 - 1,06 - 1,17 - 1,25  
 Matière 1975 - 0,82 - 0,82 - 1,17 - 1,24

Nos constatations sont donc en très bon accord avec celles des chercheurs ayant travaillé sur d'autres milieux poreux (7, 8) : la linéarité entre  $\Delta p$  et  $Q_v$  est parfaite à condition que le Nombre de Reynolds soit inférieur à 1.

RELATION ENTRE $\Delta p$ et $Q_v$		Le tableau donne les valeurs de $\Delta p$ en baryes. $10^3$				
		Tableau 12				
$\epsilon$	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	40	61	77	95	113
Matière 1976 ( $\rho_f = 1,33$ g/cm <sup>3</sup> )	0,907	0,400	0,67	0,93	1,03	1,50
	0,849	1,29	1,96	2,60	3,32	4,06
	0,788	3,14	4,80	6,07	7,55	9,25
	0,729	6,55	8,85	12,55	15,45	
	0,700	9,04	13,6	17,4		
Matière 1975 ( $\rho_f = 1,43$ g/cm <sup>3</sup> )	0,914	0,402	0,70	0,98	1,32	1,70
	0,862	1,26	2,00	2,70	3,45	4,4
	0,802	3,10	4,7	6,2	7,85	9,7
	0,749	6,27	9,4	12,2	15,3	
	0,721	8,65	12,3	15,3		

4-6 - DETERMINATION DE LA PERMEABILITE A L'EAU DE DIFFERENTS  
 =====  
 TAMPONS FIBREUX - EVOLUTION AU COURS DU TEMPS.  
 =====

On a réalisé des circulations d'eau déionisée, à 20°C et contenant un mouillant (voir § 2-6), en utilisant le dispositif expérimental décrit aux § 2-2 et 2-3. Les expérimentations ont porté

sur des tampons fibreux de différentes porosités, choisis parmi les 2 types de matières (1975 et 1976). Les caractéristiques essentielles de ces tampons fibreux sont groupées au tableau 13. Comme de coutume, on a mesuré au cours du temps, le débit volumique ainsi que la perte de charge correspondant au tampon fibreux seul ( $\Delta p_f$ ) ; puis on a calculé la perméabilité  $Q_v/\Delta p_f$ .

Les résultats sont représentés à la Fig. 30 dont l'examen conduit aux remarques suivantes :

CARACTERISTIQUES ESSENTIELLES DES TAMPONS  
FIBREUX EXPERIMENTES

Tableau 13

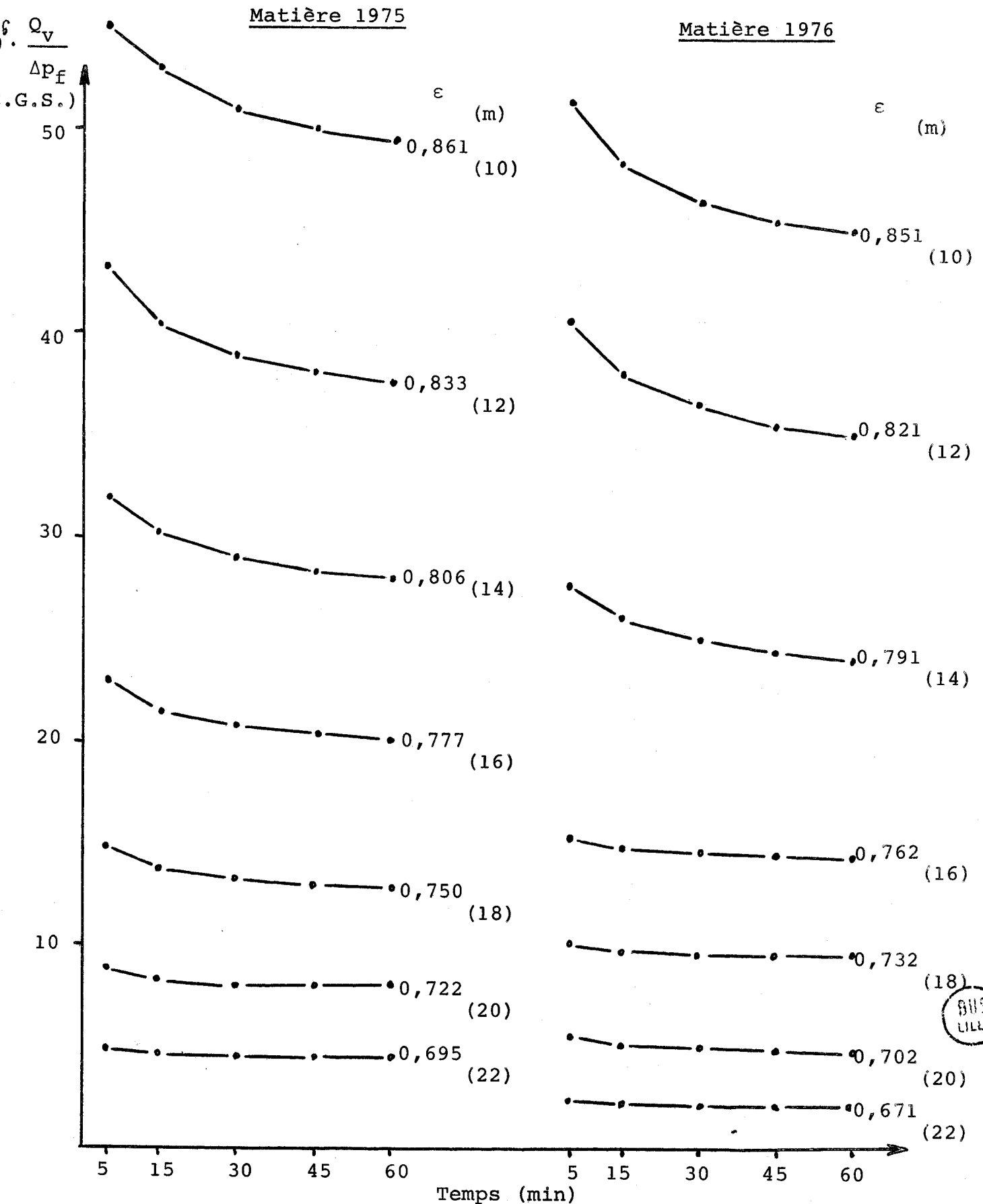
Matière 1975 ( $\rho_f = 1,43$ )	masse du tampon (g)	10,00	12,06	14,01	16,08	18,01	20,08
	Masse volumique apparente ( $\rho_a$ )	0,198	0,239	0,278	0,319	0,357	0,398
	porosité ( $\epsilon$ ) (*)	0,861	0,833	0,806	0,777	0,750	0,722
	$1 - \epsilon$	1,139	0,167	0,194	0,223	0,250	0,278
	$\frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2}$	33,1	20,7	13,9	9,43	6,75	4,88
	$\frac{Q_v}{\Delta p_f}$ théorique (sans gonflement) en C.G.S. $10^6$	622	389	261	177	127	91,5
Matière 1976 ( $\rho_f = 1,33$ )	masse du tampon (g)	10	12	14	16	18	20
	masse volumique apparente ( $\rho_a$ )	0,198	0,238	0,278	0,317	0,357	0,396
	porosité ( $\epsilon$ ) (*)	0,851	0,821	0,791	0,762	0,732	0,702
	$1 - \epsilon$	0,149	0,179	0,209	0,238	0,268	0,298
	$\frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2}$	27,8	17,3	11,3	7,82	5,47	3,98
	$\frac{Q_v}{\Delta p_f}$ théorique (sans gonflement) en C.G.S. $10^6$	632	393	256	178	124	90,5

(\*) Il s'agit de la porosité déterminée à l'état sec à partir de la masse volumique ( $\rho_f$ ) de l'élément fibreux et de la masse volumique apparente ( $\rho_a$ ) du tampon fibreux.

EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DE  $Q_v/\Delta p_f$   
FIBRE DE LIN - EAU AVEC MOUILLANT

Fig. 30

$\theta = 20^\circ\text{C}$



- 1) A masse de tampon fibreux égale, la matière 1976 conduit à une perméabilité un peu plus faible que la matière 1975.
- 2) A porosité initiale égale, les 2 matières fournissent des perméabilités à l'eau très voisines. On serait donc tenté de croire qu'elles réagissent de la même façon lors d'une circulation d'eau (par exemple, même gonflement).

En réalité cela n'est pas exact car la perméabilité d'une masse poreuse dépend non seulement de sa porosité, mais aussi de la taille des particules ; dans notre cas, les éléments fibreux de la matière 1976 sont plus gros que ceux de la matière 1975.

Lorsque la relation de KOZENY est applicable, il est possible de déterminer à priori cette perméabilité ; les valeurs présentées au tableau 13 ont été calculées en appliquant la relation de KOZENY-CARMAN et à partir de la porosité initiale (fibre non gonflée). On peut alors remarquer que pour les 2 types de matière, des tampons fibreux de même masse conduisent à des perméabilités théoriques sensiblement équivalentes. Comme les perméabilités réelles sont plus faibles en matière 1976 qu'en matière 1975, cela signifierait que la première gonfle un peu plus que la seconde.

- 3) L'évolution de la perméabilité au cours du temps est très systématique et l'allure est pratiquement la même pour toutes les courbes : diminution assez importante en début de circulation et progressivement plus faible ensuite. Dans les tout premiers moments de circulation, la matière est incomplètement et irrégulièrement imprégnée. C'est pourquoi nous n'avons commencé les mesures qu'à partir de 5 minutes.

Mais si la diminution de perméabilité entre les temps 5 et 15 minutes est de loin non négligeable, il est capital de souligner que l'évolution est encore bien plus importante entre les temps 0 et 5 minutes ; il suffit pour cela, pour une même masse de tampon fibreux, de comparer la valeur théorique du tableau 13 et le début de courbe de la Fig. 30.

4) Le rapport entre la valeur théorique de  $Q_v/\Delta p_f$  calculée à partir de la porosité à "l'état sec" et la valeur réelle observée, devrait permettre de déterminer le gonflement. Nous montrerons au § 4-10 comment on peut théoriquement y parvenir. Pour le moment, limitons-nous à considérer ce rapport comme un indice de gonflement ; il est systématiquement plus élevé à 60 minutes et systématiquement plus élevé pour la matière 1976 (voir tableau 14). Son évolution en fonction de la porosité mérite également d'être interprétée mais elle est plus complexe ; nous y reviendrons au § 4-10.

RAPPORT ENTRE LA VALEUR  $\frac{Q_v}{\Delta p_f}$  THEORIQUE  
 "(A SEC)" ET LA PERMEABILITE REELLE

Tableau 14

Masse du tampon fibreux		10	12	14	16	18	20
Mat 1975	à 5 min. de circulation	11,3	9,0	8,2	7,7	8,6	10,5
	à 60 " "	12,6	10,3	9,3	8,8	9,9	11,4
Mat 1976	à 5 min. de circulation	12,3	9,7	9,3	11,7	12,4	16,4
	à 60 " "	14,0	11,2	10,7	12,4	13,0	18,8

4-7 - FACTEURS CONDITIONNANT LA PERMEABILITE D'UN TAMPON FIBREUX  
 =====  
 DE LIN.  
 =====

Avant de poursuivre l'exposé des différents travaux expérimentaux, il paraît souhaitable de définir l'influence des facteurs susceptibles de faire varier la perméabilité d'un tampon fibreux de lin (que la relation de KOZENY soit ou non applicable avec rigueur).

1) La porosité initiale du tampon fibreux ( $\epsilon$ ).

Pour un volume donné, la valeur de ce paramètre peut être calculée à partir de la masse de fibres et de la masse volumique des éléments constitutifs.

On suppose, bien entendu, que la porosité est homogène. Si tel est le cas, une augmentation de la porosité entraîne un accroissement de la perméabilité et lorsque la relation de KOZENY est applicable, la perméabilité est proportionnelle à l'expression :

$$\frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2}$$

Quand la porosité n'est pas homogène, il est impossible de trouver une relation entre la perméabilité et la porosité si la texture du milieu n'est pas connue. Pour le chercheur, le moyen le plus simple et le plus courant d'étudier les porosités hétérogènes est de raisonner sur des mélanges de sphères de diamètres différents (12, 30 et 31).

Selon les interconnections, selon la forme des empilements et plus explicitement, selon que les canaux libres sont préférentiellement parallèles ou perpendiculaires à la direction du fluide (voir Fig. 31), le passage d'une porosité homogène à une porosité hétérogène peut se faire soit avec une augmentation, soit avec une diminution de la perméabilité.

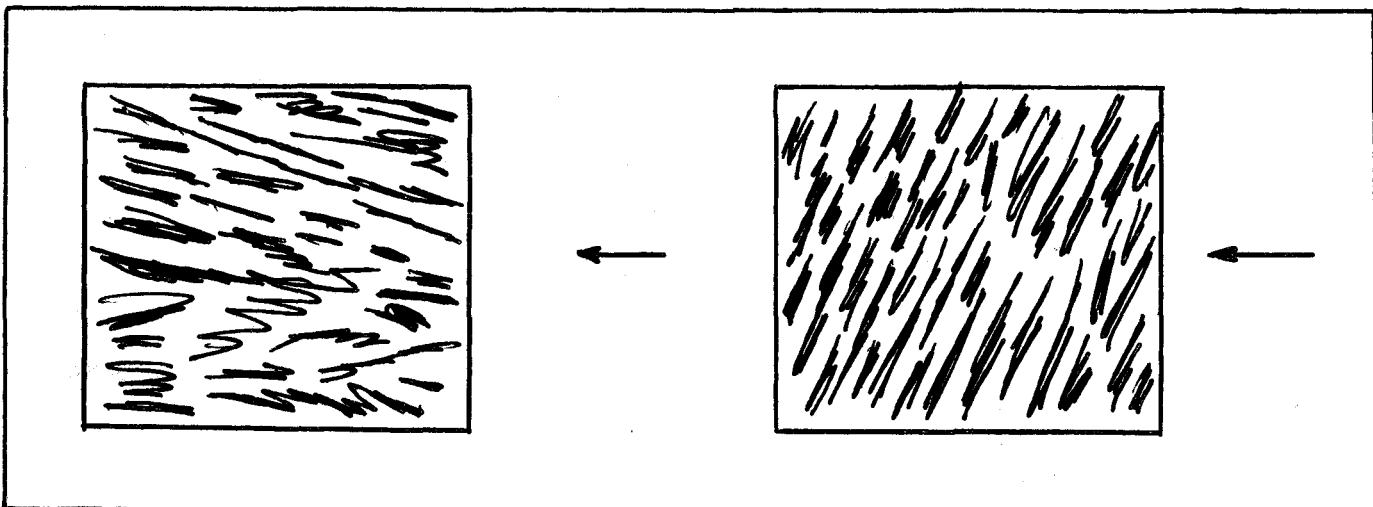


Fig. 31 - DEUX FORMES TYPES DE POROSITE HETEROGENE

2) La variation de porosité du tampon.

Tout en étant homogène, cette variation peut être positive ou négative.

La porosité est réduite lorsque la fibre gonfle et il en résulte une diminution de la perméabilité. La porosité augmente lorsque passent en solution certaines substances constitutives de la fibre.

On peut aussi avoir au cours du temps formation de porosité hétérogène, par exemple lorsque se développent des canaux préférentiels ; on observe alors généralement, une augmentation de la perméabilité.

3) La viscosité du bain.

La perméabilité est généralement fonction inverse de la viscosité du bain, mais la relation n'est linéaire que lorsque l'équation de KOZENY est applicable.

Une augmentation de la température entraîne une diminution de la viscosité d'où il résulte un accroissement de la perméabilité.

Le passage en solution de certaines substances constitutives de l'élément fibreux engendre une augmentation de la viscosité (voir annexe 3) et conséquemment une diminution de la perméabilité. Enfin, la viscosité du bain dépend de sa composition initiale (voir annexe 3).

4-8 - PERMEABILITE AUX SOLUTIONS DE CARBONATE, DE DIFFERENTS TAMPONS  
=====

FIBREUX - EVOLUTION AU COURS DU TEMPS.  
=====

La perméabilité a été déterminée pour les deux types de matières, sur des tampons fibreux de même porosité que ceux utilisés précédemment, mais en prenant cette fois, une solution de carbonate de sodium à 20 g/l à 20°C comme fluide de circulation.

Les résultats sont représentés aux Fig 32 et 33 où nous avons porté comparativement les perméabilités à l'eau et à la solution de carbonate.

- 1) L'allure des courbes est la même dans tous les cas ; la perméabilité diminue au cours du temps, mais cette décroissance est surtout importante dans les premiers temps de circulation ; elle est beaucoup plus réduite ensuite.
- 2) Pour mieux concrétiser la valeur de cette évolution au cours du temps, nous avons dressé le tableau 15 où sont consignées les valeurs du rapport :

$$\frac{\text{perméabilité à 60 minutes de circulation}}{\text{Perméabilité à 5 minutes de circulation}}$$

RAPPORT : $\frac{\text{perméabilité à 60 min. de circulation}}{\text{perméabilité à 5 min. de circulation}}$		<u>Tableau 15</u>					
Masse du tampon fibreux		10	12	14	16	18	20
Mat 1975	eau à 20°C	0,90	0,87	0,875	0,87	0,865	0,915
	carbonate 20 g/l à 20°C	0,88	0,86	0,875	0,89	0,91	0,94
Mat 1976	eau à 20°C	0,88	0,865	/	0,935	/	0,865
	carbonate 20 g/l à 20°C	0,85	0,84		0,89		0,92

Il s'en dégage les constatations suivantes :

- en circulation d'eau et pour les 2 types de matière, l'évolution au cours du temps ne semble pas fonction de la porosité, ou tout au moins, l'effet n'est pas systématique.



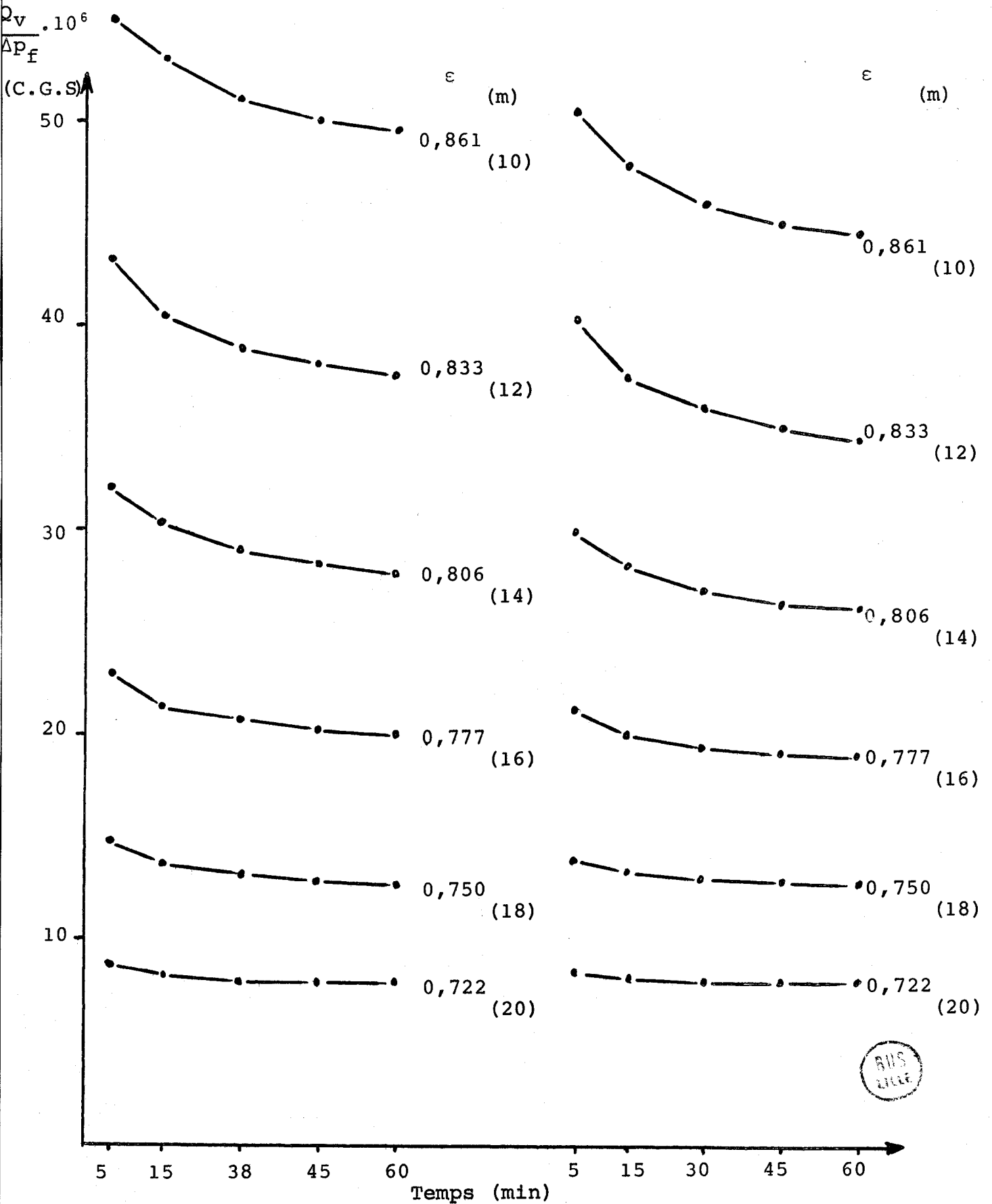
EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DE  $Q_v/\Delta P_f$   
FIBRE DE LIN - MATIERE 1975

Fig. 32

$\theta = 20^\circ\text{C}$

Eau + mouillant

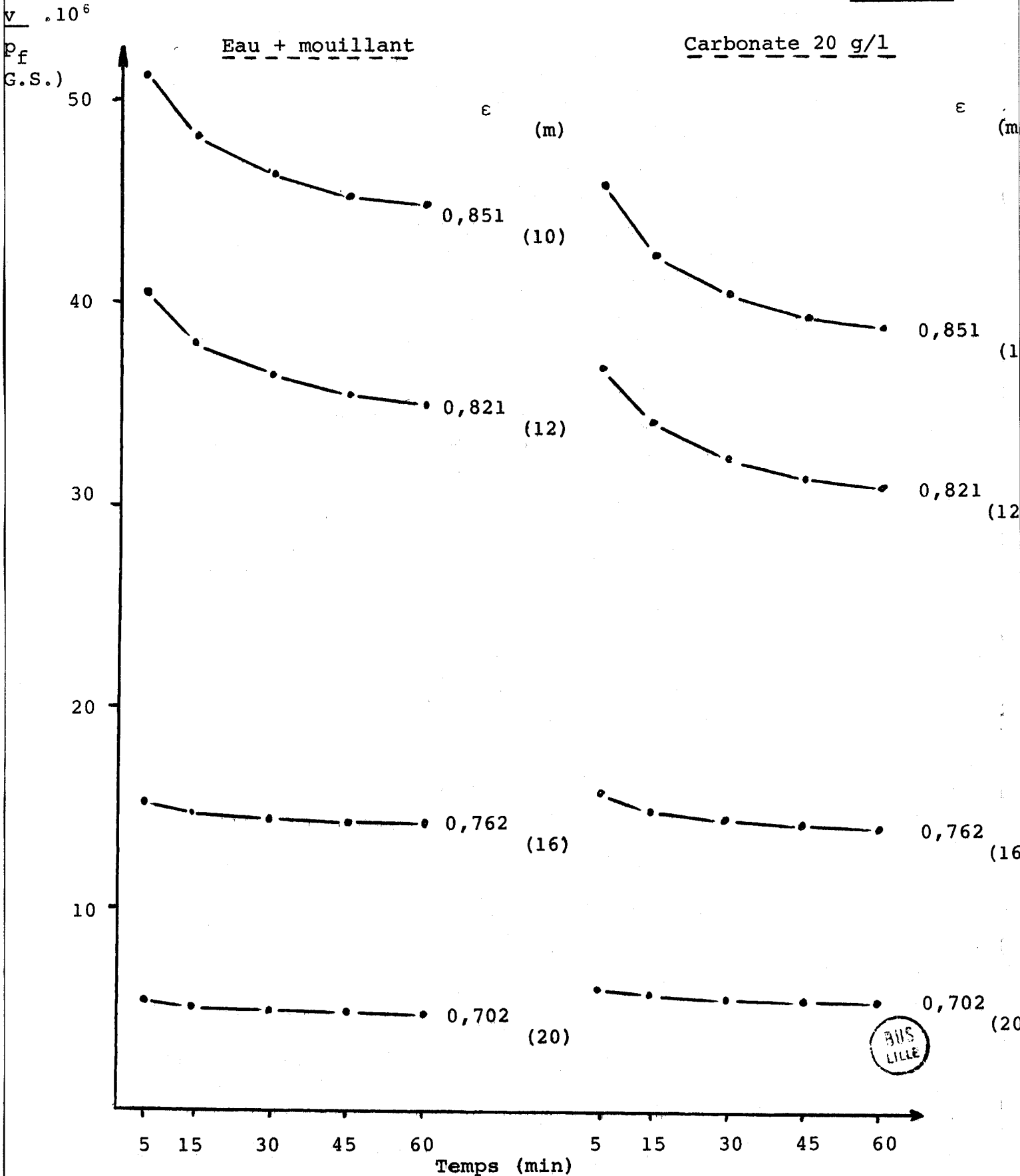
Carbonate 20 g/l



EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DE  $Q_v/\Delta p_f$   
 FIBRE DE LIN - MATIERE 1976

Fig. 33

$\theta = 20^\circ\text{C}$



- en circulation de solution de carbonate, l'évolution au cours du temps est fonction de la porosité : elle est plus limitée lorsque la porosité est plus faible.
- si l'on compare maintenant l'effet de la porosité et celui du type de fluide, on constate une interaction entre ces 2 facteurs ; plus précisément, l'évolution de la perméabilité est plus importante en carbonate qu'à l'eau lorsque la porosité est grande, mais moins importante lorsque la porosité est plus faible. En d'autres termes, entre les temps 5 min. et 60 min., la matière gonflerait plus en solution de carbonate qu'à l'eau, à condition qu'elle ait l'espace disponible.

3) Mais il est aussi intéressant de considérer la perméabilité relative en solution de carbonate par rapport à l'eau, ce qui, toutes choses égales par ailleurs, devrait permettre d'estimer un gonflement relatif de la fibre. Pour ce faire, nous avons calculé le rapport :

$$\frac{Q_v/\Delta p_f \text{ (solution de carbonate)}}{Q_v/\Delta p_f \text{ (eau)}}$$

et groupé au tableau 16, les valeurs obtenues pour les différents tampons fibreux et les 2 types de matière, à 5 minutes et à 60 minutes de circulation.

RAPPORT ENTRE LA VALEUR $Q_v/\Delta p_f$ (solution de carbonate) ET LA VALEUR $Q_v/\Delta p_f$ (eau) à 20°C		Tableau 16					
Masse du tampon fibreux		10	12	14	16	18	20
Mat. 1975	à 5 min. de circulation	0,92	0,93	0,94	0,93	0,95	0,97
	à 60 min. de circulation	0,90	0,92	0,94	0,95	1,00	1,00
Mat. 1976	à 5 min. de circulation	0,90	0,91	/	1,03	/	1,09
	à 60 min. de circulation	0,87	0,89		0,98		1,16

On peut interpréter ces résultats de 3 manières :

- a) Quels que soient la matière et le moment de circulation, la perméabilité relative (carbonate/eau) est d'autant plus faible que la porosité est élevée. Essayons d'en connaître les causes.

On peut ne pas différencier la viscosité du bain avant et après traitement, en raison du rapport de bain élevé (1/700 à 1/1400 dans notre cas). Par contre, il est nécessaire de tenir compte des différences de viscosité entre la solution de carbonate (1,07 cPo) et l'eau (1 cPo) (voir annexe 6). Le passage en solution de substances non-cellulosiques ne doit pas être négligé quant à son action sur la porosité (variation de masse anhydre du tampon. Dans notre cas, la perte de masse au bout d'une heure est :

en eau à 20°C : 3 % sur matière 1975 et 5 % sur matière 1976  
en carbonate à 20°C : 7 % " " " et 10 % " " "

L'influence de la viscosité et celle de la perte de masse, peuvent être considérées comme indépendantes de la masse du tampon fibreux. Il en résulte que l'évolution de perméabilité relative est essentiellement due à une variation de porosité c'est-à-dire de gonflement de la fibre.

Les valeurs supérieures à l'unité ne signifient pas forcément que le gonflement de la fibre est moins fort au carbonate qu'à l'eau ; cela peut s'expliquer par une influence prépondérante de la perte de masse.

- b) Influence du moment de circulation. A forte porosité initiale, la perméabilité relative carbonate/eau est plus faible à 60 min. qu'à 5 minutes de circulation, alors que c'est l'inverse qui est constaté pour des tampons fibreux de masse plus élevée.
- c) Influence du type de matière. On observe une interaction très nette entre le moment de circulation (5 ou 60 min.) et la masse du tampon fibreux.

Ces différentes constatations s'accordent parfaitement avec la conclusion du § 4-8-2.

4-9 - PERMEABILITE A DIFFERENTES SOLUTIONS ALCALINES ET A DIFFERENTES  
=====

TEMPERATURES.  
=====

Nous nous sommes cette fois, proposés de rechercher l'influence de la température et de l'alcali (carbonate à 20 g/l ou soude caustique à 2 g/l) sur la perméabilité du tampon fibreux en expérimentant une seule porosité : masse 10 g ce qui correspond à  $\epsilon = 0,861$  pour la matière 1975 et  $\epsilon = 0,851$  pour la matière 1976.

Les résultats sont présentés graphiquement aux Fig. 34 et 35.

L'allure des courbes est très systématique et semblable aux précédentes (voir Fig. 30 - 32 et 33) : la diminution de perméabilité n'est pas négligeable en début de circulation et elle est beaucoup plus faible ensuite.

Nous ferons successivement ressortir l'influence de la température, celle de l'alcali et celle de la matière.

1) Influence de la température.

On se rend déjà compte par les positions respectives des courbes des Fig. 34 et 35 que la perméabilité est d'autant plus grande que la température est élevée (ceci en raison de la diminution de viscosité). Mais pour permettre l'interprétation avec plus de précision, nous avons groupé au tableau 17, les valeurs des rapports :

$$\frac{\text{Perméabilité à } 60^{\circ}\text{C}}{\text{Perméabilité à } 20^{\circ}\text{C}} \quad \text{et} \quad \frac{\text{Perméabilité à } 90^{\circ}\text{C}}{\text{Perméabilité à } 20^{\circ}\text{C}}$$

Nous y avons adjoint les rapports :

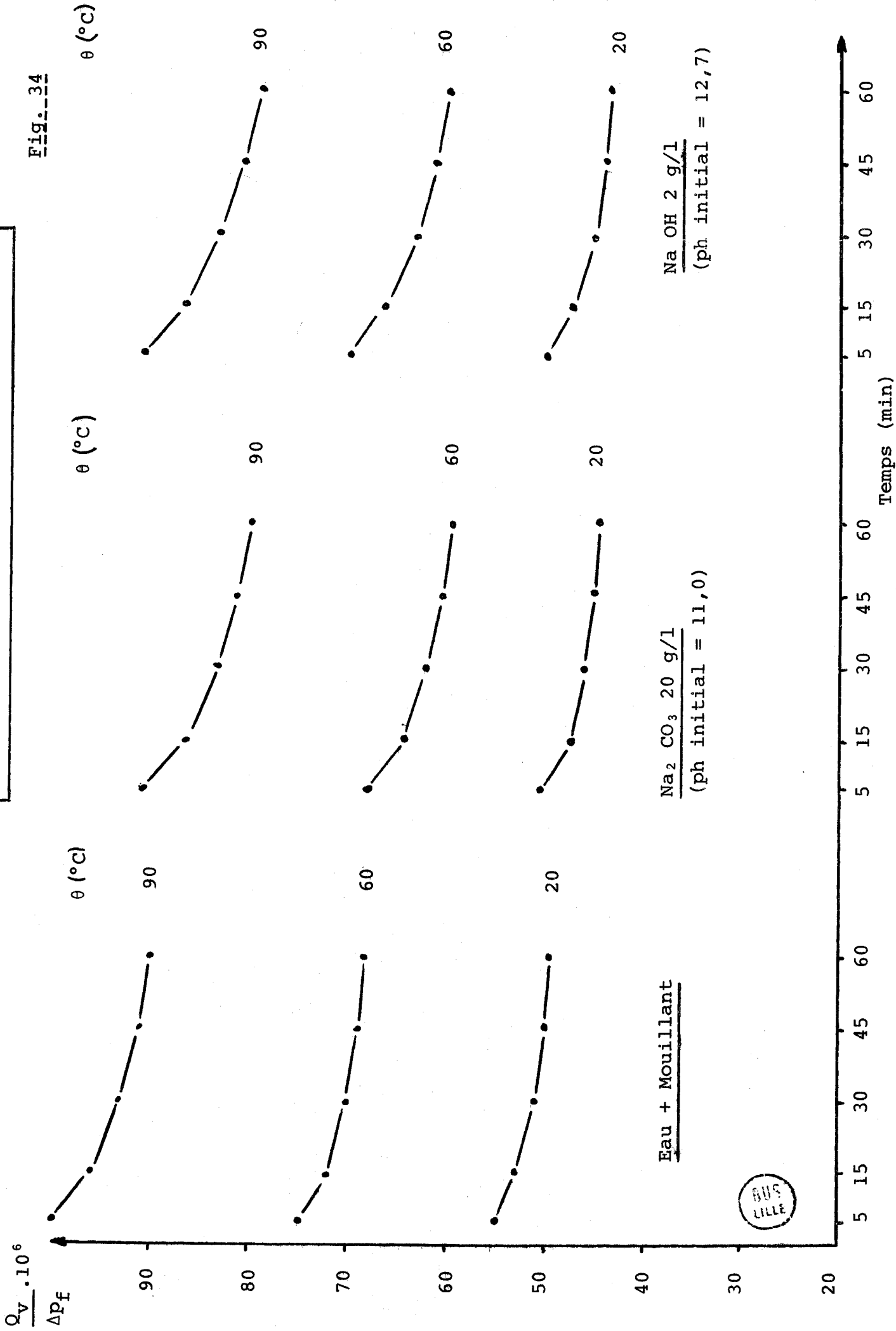
$$\frac{\eta (20^{\circ}\text{C})}{\eta (60^{\circ}\text{C})} \quad \text{et} \quad \frac{\eta (20^{\circ}\text{C})}{\eta (90^{\circ}\text{C})}$$

étant entendu que lorsque la relation de KOZENY est applicable, la perméabilité est directement proportionnelle à  $1/\eta$ .

INFLUENCE DE L'ALCALI ET DE LA TEMPERATURE  
 SUR LE COURS DU TEMPS DE  $Q_v/\Delta p_f$

Matière 1975 [ m = 10 g  
 ε = 0,861

Fig. 34



EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DE  $Q_V / \Delta P_f$   
 INFLUENCE DE L'ALCALI ET DE LA TEMPERATURE

Matière 1976 [ m = 10 g-  
 ε = 0,851

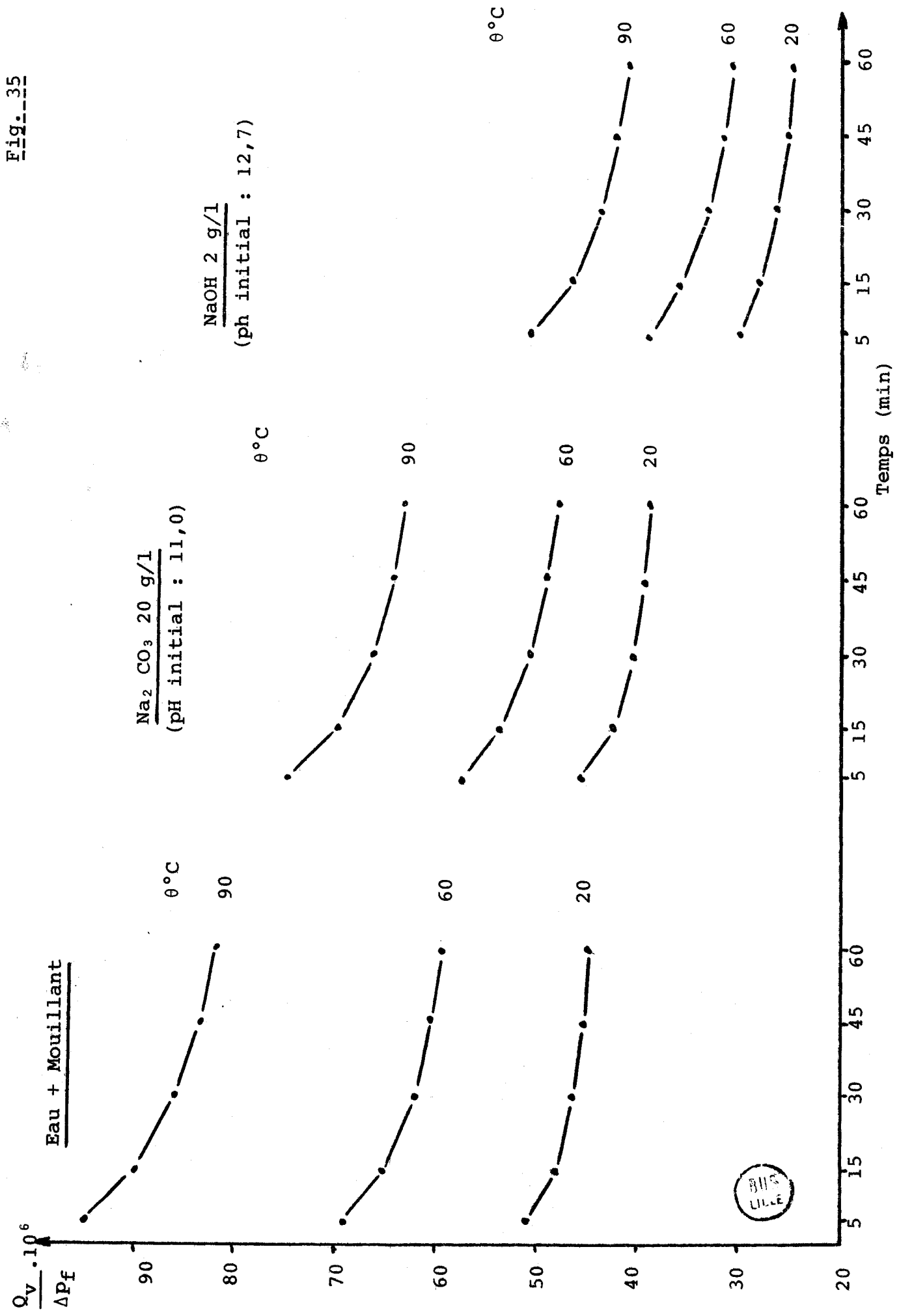


Fig. 35

RAPPORTS DE PERMEABILITE - INFLUENCE  
DE LA TEMPERATURE  $\frac{K_t 60^\circ}{K_t 20^\circ}$  et  $\frac{K_t 90^\circ}{K_t 20^\circ}$

Tableau 17

Fluide de circulation		Eau (pH = 6,7)	Carbonate 20 g/l (pH = 11)	Soude 2 g/l (pH = 12,7)
Mat. 1975	$\frac{K_t 60^\circ}{K_t 20^\circ}$ (à 5 minutes	1,36	1,35	1,40
	$\frac{K_t 60^\circ}{K_t 20^\circ}$ (à 60 minutes	1,37	1,34	1,38
	$\frac{K_t 90^\circ}{K_t 20^\circ}$ (à 5 minutes	1,82	1,80	1,82
	$\frac{K_t 90^\circ}{K_t 20^\circ}$ (à 60 minutes	1,81	1,80	1,82
Mat. 1976	$\frac{K_t 60^\circ}{K_t 20^\circ}$ (à 5 minutes	1,36	1,25	1,30
	$\frac{K_t 60^\circ}{K_t 20^\circ}$ (à 60 minutes	1,32	1,23	1,27
	$\frac{K_t 90^\circ}{K_t 20^\circ}$ (à 5 minutes	1,85	1,63	1,70
	$\frac{K_t 90^\circ}{K_t 20^\circ}$ (à 60 minutes	1,82	1,62	1,68
$\eta(20) / \eta(60)$		2,08	2,11	2,09
$\eta(20) / \eta(90)$		2,82	2,85	2,83

- a) L'augmentation de perméabilité est toujours inférieure au rapport correspondant des inverses de viscosité. Ceci montre et confirme que pour la porosité initiale étudiée ( $m = 10$  g) la relation de KOZENY n'est pas applicable. Une tendance du même type avait été constatée lors de circulation d'eau à travers des tampons de fibres de verre et de fibres de polyester (voir Fig. 15 et 17).
- b) Pour la matière 1975, l'augmentation de la perméabilité due à la température est peu influencée par l'alcali (dans les limites de notre expérimentation) et pratiquement indépendante du temps de circulation (entre 5 et 60 minutes).



c) Pour la matière 1976, l'augmentation de perméabilité due à la température, est systématiquement un peu plus faible à 60 min. qu'à 5 minutes de circulation ; cela signifierait qu'à chaud, le gonflement est plus rapide et varie moins au cours du temps. Si maintenant, on compare entre eux les différents fluides, on s'aperçoit que l'augmentation de perméabilité due à la température, est plus faible en milieu alcalin qu'en milieu neutre mais plus élevée en soude (pH initial 12,7) qu'en carbonate (PH initial 11,0). Le premier effet peut s'expliquer par un gonflement relatif à chaud plus important en carbonate qu'à l'eau ; le second effet s'expliquerait soit par un gonflement à froid déjà très important en milieu sodique, soit par le fait qu'on se rapproche du régime laminaire et qu'en conséquence, l'influence relative de la viscosité croît.

## 2) Influence de l'alcali.

On peut déjà remarquer aux Fig. 34 et 35, que pour la matière 1975, la perméabilité en milieu alcalin est un peu plus faible que la perméabilité à l'eau, alors que la différence est beaucoup plus importante pour la matière 1976.

Pour préciser cet effet, nous avons calculé les rapports :

$$\frac{\text{perméabilité au carbonate}}{\text{perméabilité à l'eau}} \quad \text{et} \quad \frac{\text{perméabilité à la soude}}{\text{perméabilité à l'eau}}$$

dans les différents cas et pour les 2 matières.

Les valeurs rassemblées au tableau 18, montrent que :

- la réduction de perméabilité due à l'alcali, est systématiquement plus importante à 60 minutes qu'à 5 minutes de circulation.
- elle est plus importante à chaud qu'à froid pour la matière 1976 et indépendante de la température pour la matière 1975.
- la réduction de perméabilité due à l'alcali, est relativement faible sur matière 1975 et du même ordre de grandeur en milieu sodique (2 g/l) qu'en milieu carbonate (20 g/l). Par contre pour la matière 1976, elle est beaucoup plus importante en milieu sodique

RAPPORTS $\frac{\text{perméab. (carbonate)}}{\text{perméab. (eau)}}$ et $\frac{\text{perméab. (soude)}}{\text{perméab. (eau)}}$		Tableau 18			
Température (°C)		20	60	90	
Matière 1975	carbon./eau	à 5 min.	0,91	0,91	0,91
		à 60 min.	0,90	0,87	0,89
	soude/eau	à 5 min.	0,91	0,93	0,91
		à 60 min.	0,89	0,88	0,88
Matière 1976	carbon./eau	à 5 min.	0,90	0,83	0,79
		à 60 min.	0,87	0,81	0,77
	soude/eau	à 5 min.	0,58	0,56	0,54
		à 60 min.	0,55	0,52	0,51

qu'en milieu carbonate. Ce phénomène est capital et risque d'avoir de grosses répercussions en traitement industriel, car le taux de réduction de perméabilité de l'ordre de 50 % mentionné au tableau 18, peut être encore bien plus élevé si la porosité initiale est plus faible (voir à ce sujet, les conclusions du § 4-10).

4-10 - ESTIMATION DU GONFLEMENT DE LA FIBRE DE LIN AU COURS D'UN  
 =====  
 TRAITEMENT AQUEUX.  
 =====

Le gonflement de fibres textiles en milieu aqueux à différents pH, de même que le gonflement de toute particule solide susceptible d'absorber un liquide, ont déjà fait l'objet de bien des recherches. Différentes méthodes ont été proposées pour mesurer ce gonflement. Nous nous limiterons à présenter sommairement 4 de ces méthodes et nous exposerons ensuite une technique que nous avons essayé d'appliquer.

a) Quelques méthodes utilisées.

- Méthode optique.

Dans son principe, elle est la plus simple ; mais en fait, elle est difficile à appliquer et présente un certain nombre d'inconvénients : elle exige de nombreuses mesures ce qui entraîne une durée d'analyse exagérée ; on n'observe qu'une dimension alors que le gonflement est au moins bidimensionnel ; les conditions d'analyse ne permettent pas toujours de faire varier dans un grand intervalle les facteurs étudiés (température, pH, etc...).

- Centrifugation.

Il s'agit d'une méthode simple et rapide, mais qui ne fournit qu'une indication et ne permet que des comparaisons. La fibre dont on connaît la masse initiale, est gonflée dans les conditions dont on se propose de déterminer les effets ; puis elle est centrifugée selon un mode opératoire précis ; la masse d'eau résiduaire permet d'estimer un indice de gonflement (32).

- Evaluation du gonflement par une désorption non isotherme (33)

Il s'agit d'une technique originale qui méritait d'être essayée. Après élimination par centrifugation de la masse fibreuse, de l'excès d'agent gonflant retenu dans l'échantillon étudié, le matériau est soumis à l'action d'un courant d'hélium très sec et très pur dont la température est élevée progressivement. La quantité de réactif contenue dans l'hélium est détectée en continu par mesure de la conductibilité thermique du gaz. L'analyse du diagramme qui comporte plusieurs pics, doit selon l'auteur, permettre de différencier l'eau de gonflement de celle se trouvant encore à la surface des fibres malgré la centrifugation préalable.

Nous avons essayé d'appliquer cette méthode en nous servant de l'appareil original de l'auteur amélioré par nos soins. Malheureusement nous n'avons pas pu la retenir pour deux raisons : l'interprétation du diagramme est très délicate ; il n'est pas possible de maintenir les conditions de gonflement dont on étudie les effets.

- Détermination du taux de gonflement de particules par l'analyse de leur sédimentation dans le fluide (34)

Selon l'auteur, il doit être possible d'estimer le taux de gonflement par la vitesse de sédimentation ou par la hauteur finale de sédimentation. Deux raisons nous incitaient à retenir ce procédé : sa simplicité et la mesure dans les conditions réelles de gonflement (pH, température...). Mais son application à nos matières expérimentales a été décevante ; il n'a jamais été possible d'obtenir des différences significatives d'une condition de travail à une autre ; il est vrai que nous nous sommes limités à des conditions de traitements industriels (pH < 12), alors que l'auteur a étudié l'action de solutions de soude relativement concentrées (jusqu'à 25 %).

b) Détermination du gonflement par la variation de perméabilité.

Nous présentons en Annexe 5, une technique qui devrait permettre de déterminer le taux de gonflement des fibres par perméométrie, moyennant certaines hypothèses que nous rappelons ci-après :

- relation de KOZENY rigoureusement applicable ;
- gonflement de la fibre bi-directionnel sans variation de longueur ;
- par de modification de forme de section.

Si  $\frac{K_{t1}}{K_{t2}}$  est le taux de réduction de perméabilité et G

le gonflement de la fibre, on a :

$$\frac{K_{t1}}{K_{t2}} = \frac{G \cdot \varepsilon_1^3}{[1 - G(1 - \varepsilon_1)]^3} \quad (\text{voir relation a28})$$

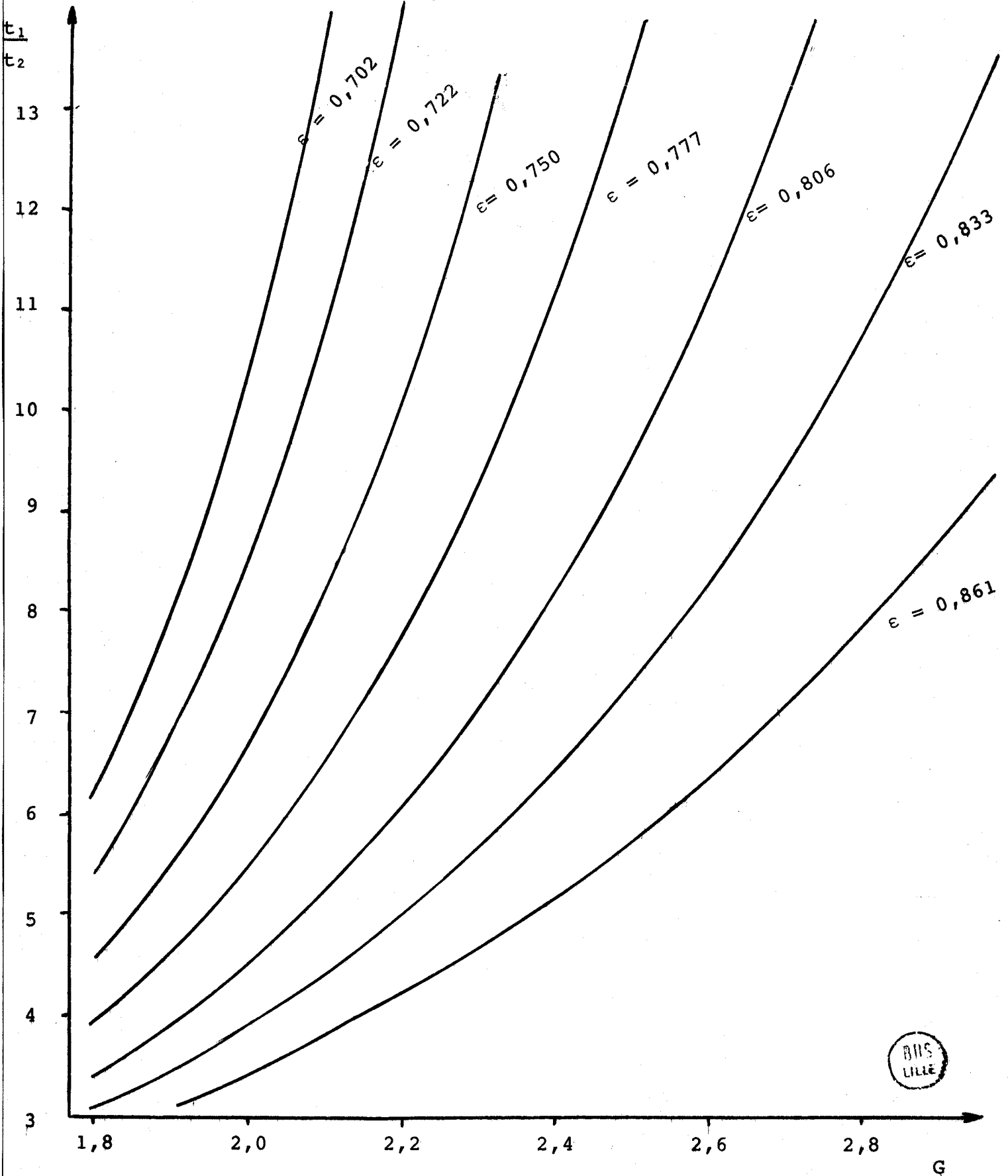
$\varepsilon_1$  étant la porosité initiale

Pour permettre de déterminer aisément G, en fonction des autres paramètres, on a tracé les courbes

$\frac{K_{t1}}{K_{t2}} = f(G)$  pour les différentes porosités initiales expérimentées (voir Fig. 36).

TAUX DE REDUCTION DE PERMEABILITE EN FONCTION  
DU TAUX DE GONFLEMENT

Fig. 36



c) Tentative d'interprétation de nos résultats.

A partir des données des tableaux 13 et 14, nous avons dressé le tableau 19 où sont groupées pour les 2 types de matière et les différentes porosités, les valeurs du taux de réduction de perméabilité  $\frac{K_{t_1}}{K_{t_2}}$  à 5 minutes et à 60 minutes de circulation. Puis, à l'aide des courbes de la Fig. 36, tracées selon la relation (a28), nous avons déduit les valeurs du taux de gonflement G.

TENTATIVE DE DETERMINATION DU TAUX DE GONFLEMENT  
(G) DES FIBRES DE LIN (EAU A 20°C)

Tableau 19

Masse du tampon (g)		10	12	14	16	18	20	22
Matière 1975	Porosité (ε)	0,861	0,833	0,806	0,777	0,750	0,722	0,695
	$\frac{K_{t_1}}{K_{t_2}}$ (à 5 min de circ.)	11,3	9,0	8,2	7,7	8,6	10,5	13,8
		(à 60 " " )	12,6	10,3	9,3	8,8	9,9	11,4
	G (à 5 min de circ.)	3,14	2,66	2,40	2,18	2,12	2,08	2,07
(à 60 " " )		3,25	2,77	2,50	2,26	2,18	2,12	2,09
Matière 1976	Porosité (ε)	0,851	0,821	0,791	0,762	0,732	0,702	0,671
	$\frac{K_{t_1}}{K_{t_2}}$ (à 5 min de circ.)	12,3	9,7	9,3	11,7	12,4	16,4	26,7
		(à 60 " " )	14,0	11,2	10,7	12,4	13,0	18,8
	G (à 5min. de circ.)	3,07	2,63	2,37	2,32	2,20	2,16	2,16
(à 60 " " )		3,19	2,72	2,45	2,35	2,22	2,20	2,18

- influence du temps de circulation. De façon systématique, le taux de gonflement est très légèrement plus élevé à 60 minutes de circulation, qu'à 5 minutes de circulation. Ceci est tout à fait logique et conforme aux prévisions.

- influence de la porosité initiale du tampon fibreux. Ici, il semble qu'on se trouve en présence de résultats aberrants lorsque la porosité initiale est grande car le gonflement ne devrait pas varier dans de telles proportions. Cela est vraisemblablement dû au fait que pour ces porosités, on ne se situe plus en régime laminaire et les valeurs de  $Q_v/\Delta p$  observées sont alors beaucoup plus faibles que celles qui découleraient de l'application de la relation de KOZENY, il en résulte que le rapport  $K_{t_1}/K_{t_2}$  est trop important, ce qui entraîne des valeurs de G anormalement élevées.

Pour des porosités relativement faibles et correspondant à des masses de fibres allant de 18 à 22 g les valeurs de taux de gonflement sont vraisemblables puisqu'elles varient peu d'une porosité à l'autre, la faible variation constatée étant toute logique. Dans cet intervalle, la matière 1976 serait un peu plus gonflée que la matière 1975. Par contre, pour des porosités initiales supérieures à 0,80, la comparaison entre matières ne serait plus valable pour la raison précédemment citée.

Un dernier coup d'oeil au tableau 19 permet de souligner 2 phénomènes essentiels :

- pour un même taux de gonflement, le taux de réduction de perméabilité est d'autant plus élevé que la porosité est faible.

- à taux de gonflement similaire, le taux de réduction de perméabilité peut être très différent d'une matière à l'autre (comparer les matières 1975 et 1976).

#### 4-11 - DETERMINATION DU NOMBRE DE REYNOLDS EN MILIEU FIBREUX

=====

GONFLE, DANS LES CONDITIONS DE CIRCULATION.

=====

On part de la relation (a14) et on exprime la finesse de l'élément fibreux, non par son diamètre mais par sa surface spécifique, ce qui est plus valable dans le cas du lin.

$$\text{On obtient: } R_e = \frac{4 Q_v \cdot \rho \cdot T}{S \cdot \eta \cdot \sigma (1-\epsilon)} \quad (24)$$

Si ① est l'état initial

et ② l'état final

et si l'on adopte pour T (tortuosité), la valeur moyenne 1,5

la relation recherchée est :  $R_e = \frac{6 \cdot Q_v \cdot \rho}{S \cdot \eta \cdot \sigma_2 \cdot (1 - \epsilon_2)}$   
(état gonflé)

La relation (a24) donne  $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{\sqrt{G}}$

et la relation (a25) donne  $1 - \epsilon_2 = G (1 - \epsilon_1)$

$$\text{Il en résulte : } R_e = \frac{6 Q_v \cdot \rho}{S \cdot \eta \cdot \sigma_1 (1 - \epsilon_1) \sqrt{G}} \quad (25)$$

Nous avons appliqué la relation (a25) à nos différents cas expérimentaux de circulation d'eau à 20°C à travers les tampons fibreux de 10 à 22 g de matières 1975 et 1976 (voir tableau 20)

Si l'on admet (non sans raison) que le Nombre de Reynolds critique se situe aux alentours de 1, on rejoint parfaitement (et on explique) l'interprétation fournie au § 4-10-C et portant sur l'influence de la porosité initiale.

Le régime serait laminaire et conséquemment la relation de KOZENY applicable, pour des masses de fibres allant de 16 à 22 g ou plus exactement, lorsque dans nos conditions opératoires, la porosité est inférieure à 0,80.



DETERMINATION DU NOMBRE DE REYNOLDS (A L'ETAT GONFLE) POUR LES DIFFERENTS TAMPONS DE LIN (circulation d'eau à 20°C)

Tableau 20

Masse du tampon (g)		10	12	14	16	18	20	22
Matière 1975 $\sigma_1 = 1,66 \cdot 10^3 \text{cm}^{-1}$	$Q_V (\text{cm}^3/\text{s})$ ( 5 min. 60 min.	41,5 36,6	32,8 28,3	24,2 21,2	17,5 15,2	11,2 9,7	6,7 6,1	3,7 3,4
	$1 - \epsilon_1$	0,139	0,167	0,194	0,223	0,250	0,278	0,305
	G ( à 5 min. à 60 min.	3,14 3,25	2,66 2,77	2,40 2,50	2,18 2,26	2,12 2,18	2,08 2,12	2,07 2,09
	$Re$ (	4,9 4,2	3,5 3,0	2,3 2,0	1,5 1,3	0,89 0,76	0,48 0,44	0,24 0,22
Matière 1976 $\sigma_1 = 1,51 \cdot 10^3 \text{cm}^{-1}$	$Q_V (\text{cm}^3/\text{s})$ ( 5 min. 60 min.	38,5 33,8	30,5 26,4	20,7 18,1	11,6 10,8	7,6 7,2	4,2 3,6	1,81 1,66
	$1 - \epsilon_1$	0,149	0,179	0,209	0,238	0,268	0,298	0,329
	G ( à 5 min. à 60 min.	3,07 3,19	2,63 2,72	2,37 2,45	2,32 2,35	2,20 2,22	2,16 2,20	2,16 2,18
	$Re$ (	4,7 4,0	3,3 2,8	2,1 1,8	1,0 0,9	0,61 0,57	0,30 0,26	0,12 0,11



Chapitre V

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CIRCULATION RADIALE DU  
BAIN A TRAVERS LES BOBINES DE MECHE DE LIN.

Dans le cas d'une bourre textile homogène, il n'existe qu'un seul type d'interstices : les espaces entre fibres. Mais, très souvent, les emballages textiles sont constitués de produits élaborés dont la texture est organisée. On se trouve alors en présence de plusieurs types d'interstices. Par exemple pour la mèche, il doit y avoir les espaces entre spires de mèche dans la bobine et les espaces entre fibres dans la mèche.

C'est la raison pour laquelle, il était nécessaire d'étudier le comportement au traitement aqueux, d'une telle présentation. Certes l'interprétation est alors difficile et nous verrons que si l'on peut très souvent dégager des tendances systématiques dues à l'influence de tel ou tel facteur, la mise en équation des résultats ou leur harmonisation avec des modèles théoriques, est infiniment plus délicate.

5-1 - INSTALLATION EXPERIMENTALE.  
=====

On a repris le montage qui a servi aux travaux de circulation sur fibre de verre, (voir § 2-2 et Fig. 5) en modifiant la partie dans laquelle est disposée la matière textile.

La cellule de mesure décrite au § 2-3 est remplacée par un récipient contenant la bobine de mèche (voir fig. 37).

La bobine de mèche est alimentée par le centre, de manière que la circulation du fluide soit radiale, dans le sens intérieur-extérieur. L'évacuation du bain se fait par 2 tubulures dont l'une peut être partiellement obturée ce qui permet de maintenir un niveau constant, simulant ainsi le bac industriel.

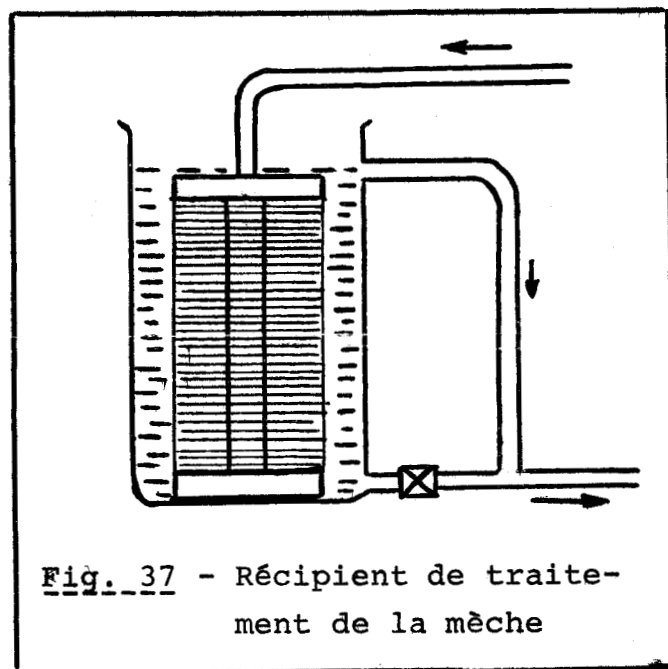


Fig. 37 - Récipient de traitement de la mèche

5-2 - PRESENTATION DE LA MATIERE TEXTILE.  
=====

La mèche de lin (légèrement tordue) est toujours présentée sur bobine (ou bobinot) de banc-à-broches en polypropylène à fût perforé. Le renvidage se fait à spires jointives. Selon les fabrications, différents types ou formats de bobinots sont utilisés, dont les caractéristiques essentielles sont groupées au tableau 21.

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES BOBINOTS  
UTILISES EN PREPARATION LIN

Tableau 21

	8 x 4	9 x 5	10 x 5 1/2	11 1/2x 5 1/2
Format de bobinot (pouces)				
Diamètre extérieur ØE (cm)	10,1	12,7	14,0	14,0
Diamètre intérieur ØI (cm)	4,1	5,0	5,0	5,0
Hauteur utile (cm)	20,2	22,8	25,4	29,2
Volume utile (cm <sup>3</sup> )	1350	2430	3410	3920
Masse à vide (g)	151	298	335	348

5-3 - PERMEABILITE A L'EAU, DE BOBINES DE MECHE (8 x 4 pouces).

=====

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE.

=====

La matière utilisée est un lin normalement roui cultivé en 1973. La mèche a les caractéristiques essentielles suivantes :

- Titre : N° métrique = 2,0
- Torsion : 24 tours/mètre (coefficient = 17,0)

On a étudié des circulations d'eau déionisée (pH = 6,7) à 3 températures (40 - 60 et 90°C) à travers des bobines de mèche de format 8 x 4 pouces.

La masse volumique apparente ( $\rho_a$ ) de la matière sur son support (qu'on appelle couramment densité de renvidage) est 0,335 g/cm<sup>3</sup>, ce qui, pour une masse volumique d'élément fibreux ( $\rho_f$ ) de 1,4 g/cm<sup>3</sup>, correspond à une porosité  $\epsilon = 0,76$ .

Dans tous les cas, on a mesuré au cours du temps (de 3 à 85 minutes) le débit volumique et la perte de charge correspondant à l'empaquetage textile. Les valeurs de perméabilité ( $Q_v/\Delta p$ ) représentées à la Fig. 38, sont des moyennes correspondant à 2 essais répétitifs.

Il apparaît très nettement que les courbes sont formées de 2 parties : une partie décroissante qui est d'autant plus marquée que la température est plus faible, et une partie ascendante qui est d'autant plus importante que la température est plus élevée ; dans cette partie croissante, l'expression  $Q_v/\Delta p$  semble tendre vers une valeur constante qui est atteinte d'autant plus rapidement que la température est plus élevée. Quant au minima, il est lui aussi, atteint d'autant plus vite que la température est plus élevée.

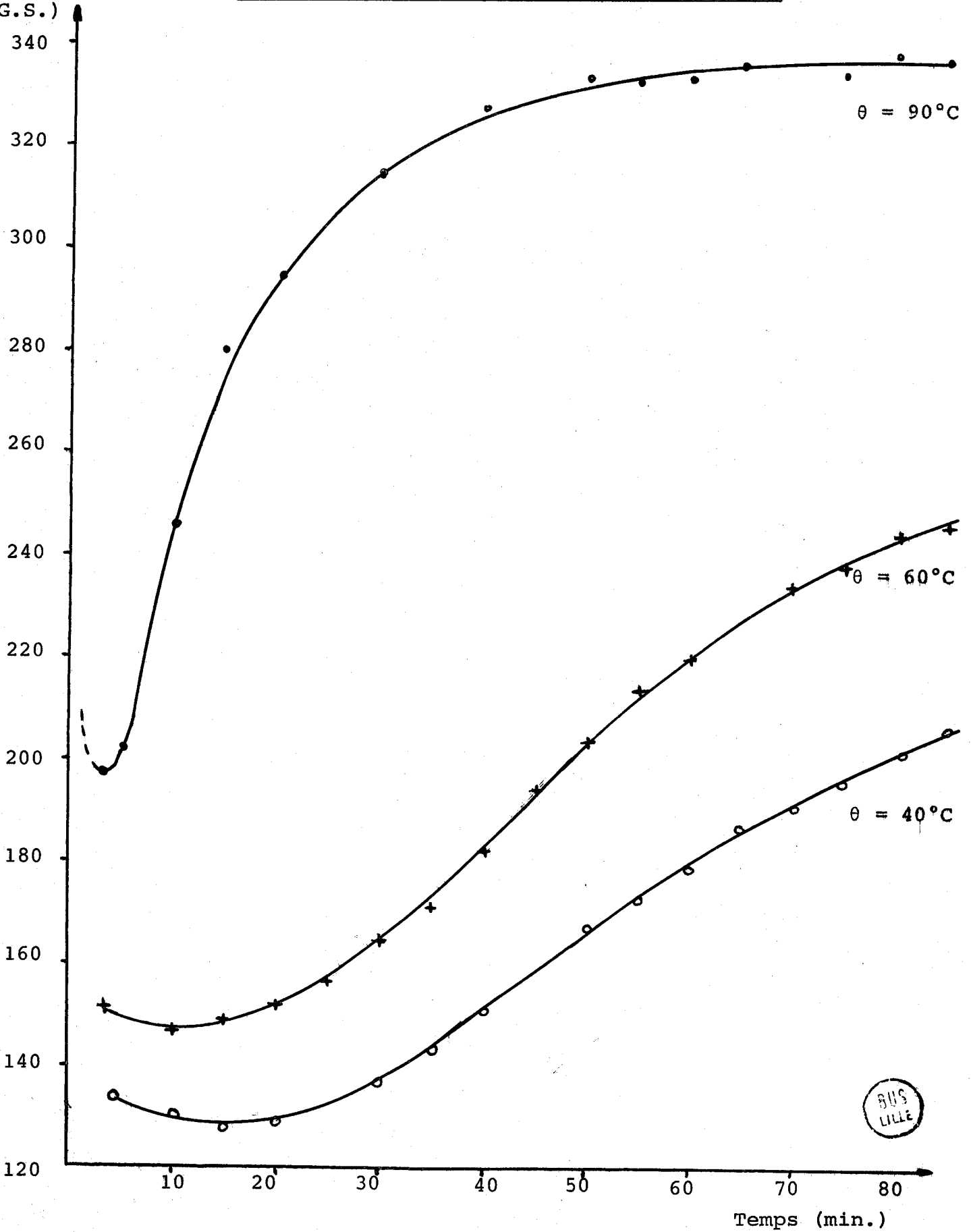
a) Evolution au cours du temps.

Pour interpréter valablement ces courbes, il paraît souhaitable de rappeler l'influence des différents facteurs dont nous avons représenté l'image à la Fig. 39.

PERMEABILITE A L'EAU DE BOBINES DE MECHE  
INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

Fig. 38

$\sqrt{\Delta p} \cdot 10^6$   
(C.G.S.)



INFLUENCE DE DIFFERENTS FACTEURS SUR  
L'EVOLUTION DE LA PERMEABILITE AU COURS DU TEMPS.

Fig. 39

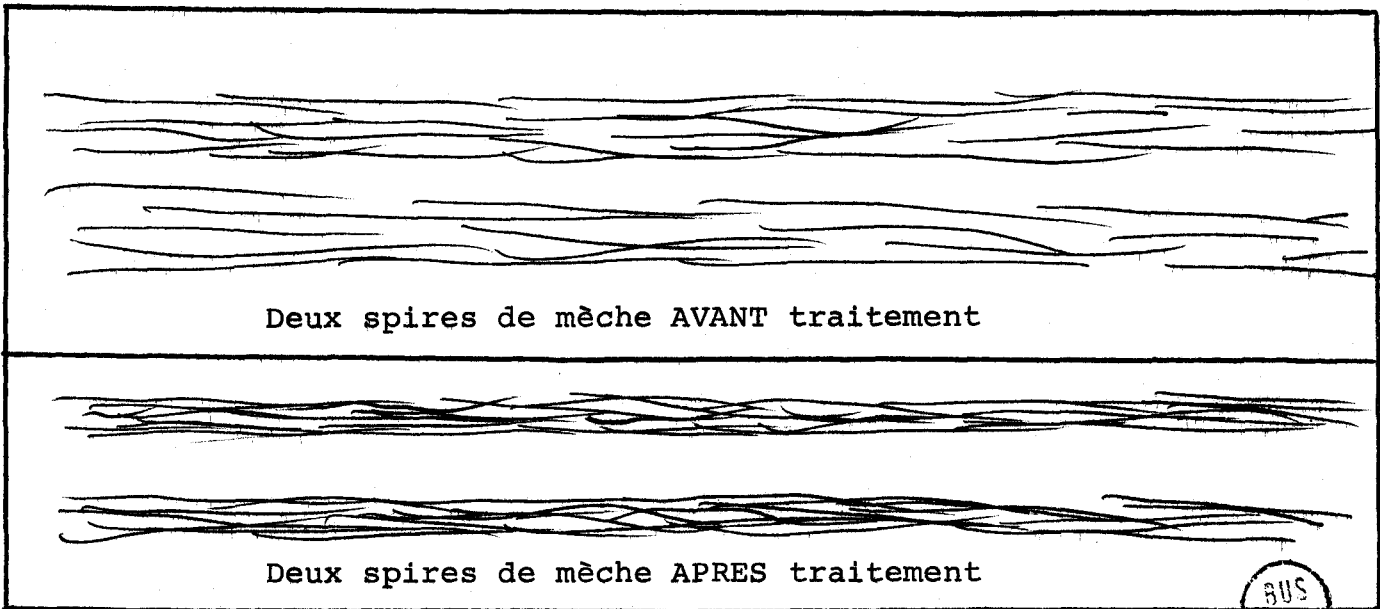
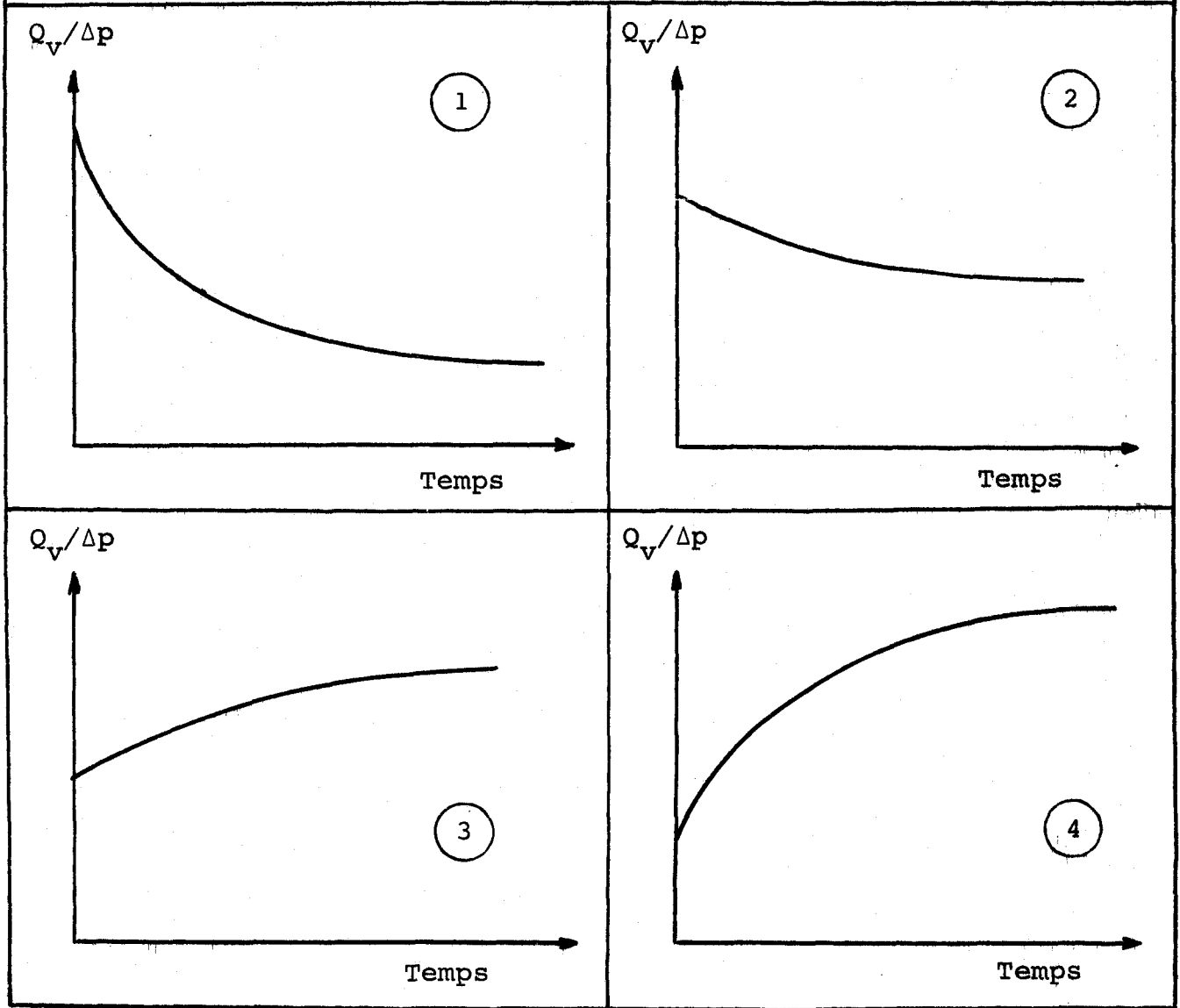


Fig. 40 - EFFET DU TRAITEMENT SUR LE "DIAMETRE" DE LA MECHE

BUS  
LILLE

- ① - Le gonflement de la fibre entraîne une diminution de la perméabilité.
- Le passage en solution de certaines substances, entraîne à la fois :
  - ② - une réduction de la perméabilité par augmentation de la viscosité ;
  - ③ - un accroissement de la perméabilité par réduction de la masse fibreuse.
- ④ - Enfin, dans le cas de la mèche, un autre phénomène intervient : c'est la réduction de sa section, ce qui donne plus d'importance aux espaces entre spires et augmente de ce fait, la perméabilité.

Cet effet 4 a été mis en évidence par des mesures optiques du "diamètre" de la mèche dont les résultats seront présentés au tableau 24. Schématiquement, le phénomène de contraction de la mèche est simulé à la Fig. 40.

L'évolution de la perméabilité au cours du temps est donc la somme des 4 effets mentionnés ci-dessus. La partie décroissante des courbes de la Fig. 38 s'explique par les effets 1 et 2, et la partie croissante par les effets 3 et 4.

Les effets 2 et 3 sont généralement peu importants et se compensent à peu près l'un l'autre. Les effets 1 et 4 apparaissent comme fondamentaux et leur cumul engendre une courbe à minima telle que celles de la Fig. 38. Nous montrerons au § 5-5-c que l'effet 4 est différent lorsqu'on élève progressivement la température.

#### b) Influence de la température.

La comparaison des perméabilités en fonction des températures est très délicate en raison de la variation au cours du temps, différente d'une température à l'autre ; par exemple à 60 minutes de circulation, le régime stationnaire semble atteint pour la température 90°C, alors qu'il ne l'est pas pour les températures 40 et 60°C. Néanmoins nous avons essayé, au tableau 22, d'établir un parallèle entre les rapports de perméabilité et les rapports des inverses de viscosité correspondants.

BUS  
LILLE

RAPPORTS DE PERMEABILITE - INFLUENCE DE LA  
TEMPERATURE  $\frac{K_t^{60^\circ}}{K_t^{40^\circ}}$  et  $\frac{K_t^{90^\circ}}{K_t^{40^\circ}}$

Tableau 22

Température (°c)	60	90
$K_t^{60}/K_t^{40}$ ou $K_t^{90}/K_t^{40}$ à 50 min. de circ.	1,21	1,98 (*)
à 85 min. de circ.	1,20	1,64
$\eta_{40}/\eta_{60}$ ou $\eta_{40}/\eta_{90}$	1,40	1,89

(\*) Comparaison non valable

D'une façon générale, les rapports de perméabilité sont inférieurs aux rapports inverses de viscosité. Cela peut avoir plusieurs raisons :

- les valeurs comparées ne sont pas rigoureusement correspondantes à cause de fluctuations au cours du temps, différentes d'une température à l'autre ;
- l'écoulement ne serait pas parfaitement laminaire et l'équation de KOZENY ne serait pas rigoureusement applicable. Bien que la porosité 0,76 ait conduit sur bourre fibreuse à un nombre de Reynolds voisin de 1 (voir tableau 20), cette seconde hypothèse n'est peut-être pas à écarter car la texture de la bobine doit conduire à un écoulement différent de celui observé en bourre à porosité initiale globale égale.

c) Rôle de la porosité - Tentative d'interprétation.

Ici encore, il sera difficile de vérifier l'application de relations théoriques en raison des différents types d'interstices dans la bobine de mèche, ce qui conduit à une porosité hétérogène ; on ne pourra que formuler des tendances.



Essayons d'abord de comparer, pour une même température (40°C) et une même porosité initiale globale ( $\epsilon = 0,76$ ), les perméabilités ( $Q_v/\Delta p$ ) obtenues d'une part sur bourre, d'autre part sur bobines. Plus exactement, comme la géométrie n'est pas la même pour les 2 présentations, nous comparerons ;

la valeur  $Q_v/\Delta p \cdot 10^6 \cdot \frac{L}{S}$  obtenue en bourre,

et la valeur  $Q_v/\Delta p \cdot 10^6 \cdot \frac{\text{Log } \frac{\varnothing E}{\varnothing I}}{2\pi \cdot H}$  obtenue sur bobine

avec dans notre cas,  $L = 4,02 \text{ cm}$  -  $S = 12,5 \text{ cm}^2$   
 $\varnothing E = 10,1 \text{ cm}$  -  $\varnothing I = 4,1 \text{ cm}$  et  $H = 20,2 \text{ cm}$

COMPARAISON DES PERMEABILITES "BOURRE DE FIBRES" ET "BOBINE DE MECHE" à  $\theta = 40^\circ\text{C}$  et  $\epsilon = 0,76$  Tableau 23

Temps de circulation (min)	5	15	30	45	60
$\frac{Q_v}{\Delta p} \cdot 10^6$ Bourre	20,3	19,1	18,3	17,9	17,7
$\Delta p$ Bobine de mèche	133	128	137	159	178
$\frac{Q_v}{\Delta p} \cdot 10^6 \cdot \frac{L}{S}$ (bourre)	6,55	6,15	5,9	5,75	5,7
$\frac{Q_v}{\Delta p} \cdot 10^6 \cdot \frac{\text{Log } \frac{\varnothing E}{\varnothing I}}{2\pi H}$ (bobine de mèche)	0,945	0,91	0,97	1,13	1,26

ces transformations étant justifiées par les relations (3) et (4).

Ces valeurs représentent la perméabilité spécifique à  $\eta$  près, ce dernier paramètre étant constant pour une température donnée.

Il est curieux de constater (voir tableau 23) des différences aussi importantes entre la bourre et la bobine, la perméabilité relative étant plus faible dans le second cas. On ne peut pas mettre en doute les valeurs obtenues en bourre puisqu'elles font partie de toute une série dans laquelle elles occupent une position tout à fait vraisemblable. On expliquerait les valeurs faibles obtenues en bobines, soit par un régime d'écoulement différent, soit par des "porosités mortes", soit par le fait que le régime stationnaire n'est pas atteint ; mais de toutes façons, notre position à ce sujet reste perplexe.

d) Répartition des porosités dans la bobine de mèche.

La valeur  $\epsilon = 0,76$  fournie plus haut, est une porosité initiale globale. Mais en raison de la constitution de la bobine, cette porosité n'est pas homogène et il semble intéressant d'en étudier la répartition.

Pour ce faire, nous avons essayé de déterminer la section moyenne de la mèche (à l'état initial) par voie optique, en examen longitudinal. L'appareil utilisé est le "Projectina" et on mesure le diamètre ou plus exactement la largeur de la mèche très légèrement tendue et non écrasée. Dans ces conditions, on peut considérer que la largeur moyenne est assez voisine d'un diamètre moyen équivalent d'où l'on déduit la section moyenne.

En raison de la dispersion assez élevée (coefficient de variation de l'ordre de 20 %), nous avons été amenés à effectuer un nombre de mesures assez important (entre 60 et 100), ce qui conduit à un intervalle de confiance statistique de 4 à 5 % (au risque 5 %).

Dans notre cas, on a observé pour la mèche expérimentée, un diamètre moyen de 1,59 mm (à l'état sec).

Si l'on applique la relation (a30) (voir Annexe 6), on obtient, pour la mèche, une porosité de 0,82. A priori, cette valeur peut paraître assez élevée, mais en fait elle n'a rien de surprenant car des coupes transversales effectuées dans un tel matériau montrent de façon indubitable que les éléments fibreux sont très écartés l'un de l'autre.

Mais la porosité moyenne de la matière textile sur la bobine est  $\epsilon = 0,76$ . On est donc bien obligé d'admettre que le renvidage de la mèche sur la bobine s'effectue avec compression et que les interstices entre spires à l'état initial, ne sont pas aussi importants qu'on pourrait le croire.

Bien entendu, nous n'avons abordé ici que la porosité à "l'état sec". Nous montrerons au § 5-5, comment elle peut évoluer au cours du traitement aqueux.

Remarque.

Nous avons considéré la section de la mèche comme circulaire et utilisé pour le calcul de son aire, un "diamètre" égal à la largeur moyenne mesurée. Cette approximation conduit à une aire légèrement trop élevée et conséquemment à une porosité un peu surfaite.

5-4 - PERMEABILITE DE BOBINES DE MECHE (10 x 5 1/2 POUCES).

=====

INFLUENCE DE LA MATIERE ET DE L'ALCALI UTILISE.

=====

Il est courant d'utiliser pour le débouillissage du lin, soit une solution de carbonate de sodium, soit une solution alcaline contenant un mélange de carbonate et de soude caustique. Or les premiers essais industriels de débouillissage de la matière 1976, effectués sur matériel "demi-grand" avec des mélanges de carbonate/soude ou des solutions de soude même peu concentrées (2 g/l), se sont révélés catastrophiques, les bobines étant très irrégulièrement traitées.

On pouvait penser à un manque de circulation mais il était impossible de l'affirmer, les appareils industriels n'étant généralement pas équipés de débitmètres.

C'est pour essayer d'expliquer ces méfaits que nous avons entrepris les travaux décrits ci-après. Les matières expérimentées sont celles utilisées précédemment, décrites au § 4-1 et dont les caractéristiques essentielles et le comportement à l'état de bourre sont exposés au Ch. 4. La fibre est cette fois, présentée sous forme de mèche renvidée sur bobinot de format 10 x 5 1/2 pouces.

a) Les principales caractéristiques de la mèche sont les suivantes :

- Titre = N° métrique = 2,0 (500 Tex)
- Torsion = 24 tours/mètre (coefficient 17,0)

	<u>Matière 1975</u>	<u>Matière 1976</u>
Masse volumique élément fibreux ( $\rho_f$ )	1,43	1,33
$\rho_a$ sur bobine	0,34	0,33
$1 - \epsilon = \frac{\rho_a}{\rho_f}$	0,238	0,248
$\epsilon$ global	0,762	0,752
D mèche initial (mm)	1,58	1,98
$1 - \epsilon$ mèche	0,178	0,122
$\epsilon$ mèche	0,822	0,878

Arrêtons-nous un moment sur ces chiffres qui requièrent quelques explications :

- Le diamètre apparent de la mèche 1976 est nettement plus élevé que celui de la mèche 1975. Ceci est la confirmation scientifique de constatations faites par le praticien. On peut l'expliquer par le fait que l'élément fibreux de la matière 1976 est moins dense, moins souple et plus gros que celui de la matière 1975.
- On confirme une constatation antérieure, à savoir qu'à "l'état libre", la mèche est plus poreuse que lorsqu'elle se trouve renvidée sur la bobine ; et la différence est surtout importante pour la matière 1976. Cela signifie que cette dernière est relativement très comprimée, au cours du renvidage, et on comprend alors pourquoi des ennuis ont été rencontrés au banc-à-broches lors du travail de cette matière, ce qui a conduit les chefs d'atelier, soit à réduire la masse volumique apparente ( $\rho_a$ ) quand cela était possible, soit (et le plus souvent), à accroître la torsion de la mèche.

b) On a réalisé sur les 2 types de matière, 2 traitements alcalins se définissant comme suit :

- carbonate de sodium à 20 g/l : 1 heure de circulation à 90°C
- soude caustique à 2 g/l : 1 " " "

Les concentrations et la température ont été choisies comme telles afin de rester en conformité avec les traitements industriels courants. Comme de coutume, on a mesuré au cours du temps, le débit volumique et la perte de charge, et déterminé les valeurs de perméabilité  $Q_v/\Delta p$ . Celles-ci, ainsi que les pH des différentes solutions sont représentés à la Fig. 41.

c) Evolution du pH du bain.

A l'état initial, les pH correspondent bien aux valeurs que l'on peut estimer théoriquement compte tenu du degré d'ionisation. L'évolution au cours du temps, plus lente en carbonate qu'en soude s'explique par l'ionisation partielle de l'alcali et sa concentration. L'évolution plus rapide sur matière 1976 que sur matière 1975 peut être due à une consommation plus importante d'alcali, la fibre contenant davantage de substances non-cellulosiques qui s'éliminent aisément en milieu alcalin.

Il faut toutefois noter que cette décroissance du pH du bain, correspond non seulement à une consommation réelle de soude ou de carbonate par les substances non-cellulosiques du lin, mais aussi à une "retenue" de l'alcali par la fibre ; et c'est la raison pour laquelle il est toujours difficile de rincer un matériau cellulosique ayant subi un traitement alcalin (voir à cet effet, à la Fig. 41, l'évolution du pH des eaux de rinçage).

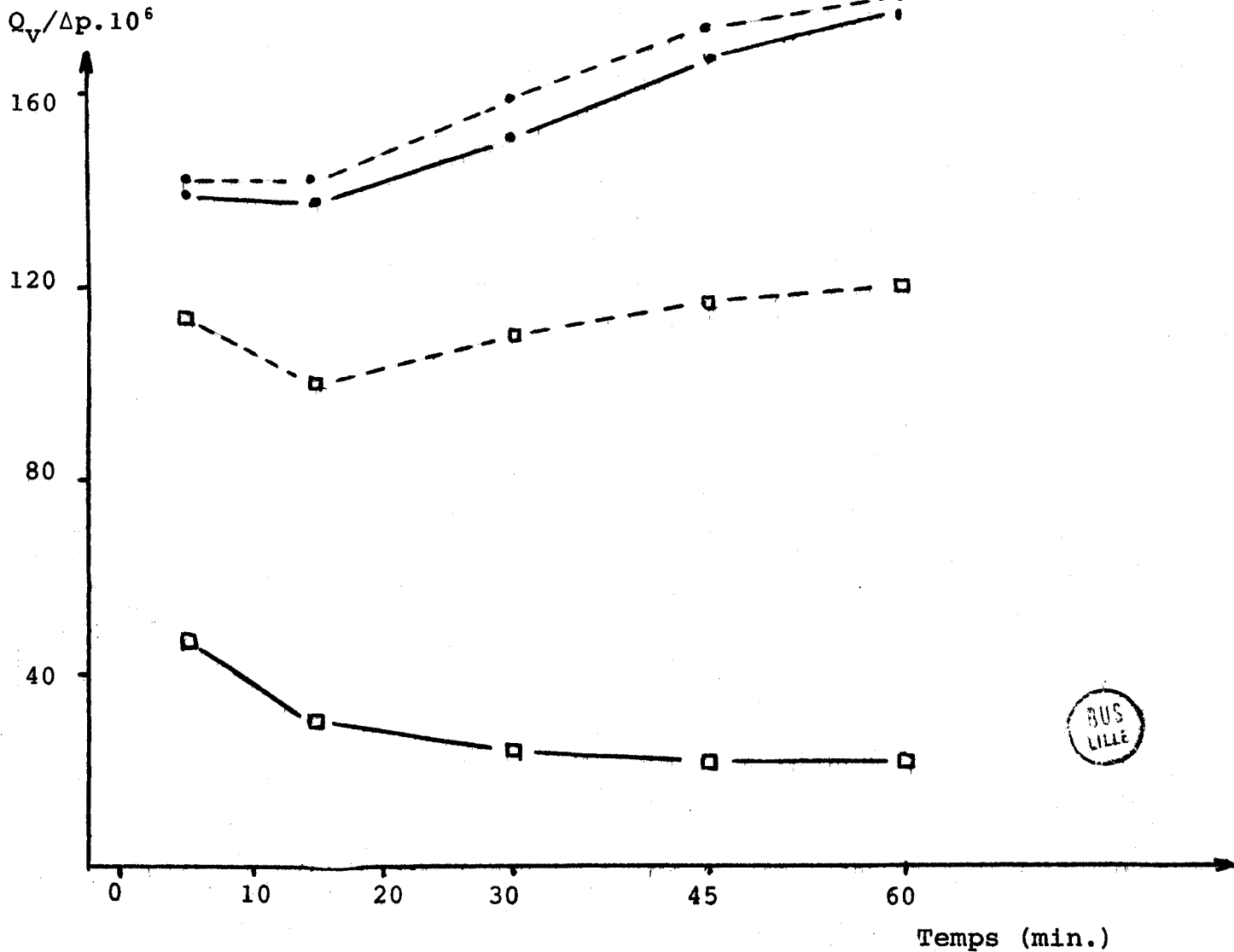
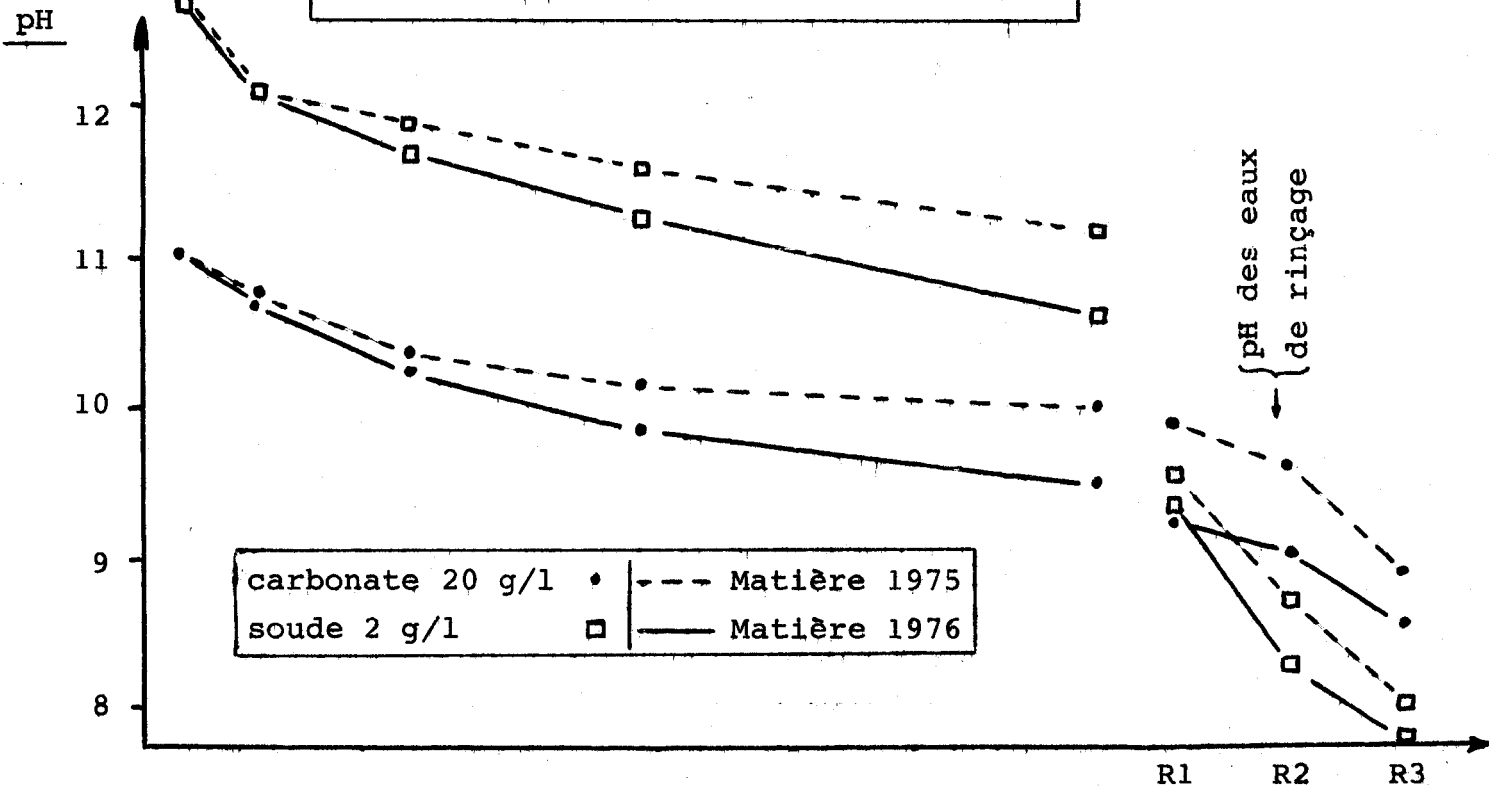
d) Influence de l'alcali et de la matière sur la perméabilité.

L'influence de l'alcali est très nette : la perméabilité est plus faible lorsque le pH initial est plus élevé. Ceci serait consécutif à un gonflement de la fibre plus important en solution de soude qu'en solution de carbonate et surtout pour la matière 1976. Une tendance similaire avait d'ailleurs été constatée en bourre (voir Fig. 35).

Le comportement de la matière 1976 est typique : En solution de carbonate, sa perméabilité est à peine plus faible que celle observée en matière 1975. Par contre, en solution sodique et à 60 minutes de circulation, cette perméabilité est divisée par 8 par rapport à celle obtenue sur matière 1975 à porosité initiale très voisine.

PERMEABILITE DE BOBINES DE MECHE  
INFLUENCE DE LA MATIERE ET DE L'ALCALI

Fig. 41



Ceci explique parfaitement les difficultés rencontrées industriellement lors des premiers traitements effectués sur la nouvelle récolte.

Par la suite, de très nombreux essais comparatifs de perméabilité en laboratoire et de traitements semi-industriels ont été réalisés. Leur méthodologie et leurs résultats ne peuvent pas être présentés dans ce rapport en raison de leur caractère confidentiel et du volume qu'ils représentent ; ils ont abouti à la conclusion suivante :

Lorsque la perméabilité est inférieure à  $60 \cdot 10^{-6}$  (C.G.S.) ce qui pour notre appareillage correspond à un débit volumique de l'ordre de  $45 \text{ cm}^3/\text{s}$ , la régularité de nuance lors d'un blanchiment effectué en bac industriel (cuve ouverte à pression atmosphérique), ne peut être garantie.

Cela ne signifie pas forcément que les mêmes ennuis seraient apparus sur notre appareillage de laboratoire au débit volumique ci-dessus mentionné. On fournit simplement une valeur critique de perméabilité de la bobine au-dessous de laquelle l'appareillage industriel, compte tenu du volume important de matière traitée, des nombreuses fuites toujours possibles, et des irrégularités de porosité, ne permet plus de fournir un traitement régulier et répétitif.

e) Evolution de la perméabilité au cours du temps. (Fig. 41)

Pour interpréter les courbes représentatives de cette évolution, on peut considérer qu'elles correspondent au cumul des influences des différents facteurs signalés au §5-3-a.

Pour les solutions de carbonate, l'effet 4 semble être prédominant sur l'effet 1 déjà à partir de 5 minutes de circulation.

En solution de soude et matière 1975, on observe bien les 2 effets : effet 1 prédominant jusqu'à 15 minutes de circulation et effet 4 au-delà de ce temps.

En solution de soude et matière 1976 l'effet de gonflement est seul prépondérant et masque tous les autres.

Nous avons défini au § 5-4-d, une valeur de perméabilité critique conditionnant les garanties de traitement industriel. Mais la forme de la courbe représentant l'évolution de la perméabilité au cours du temps est aussi riche d'enseignement et le degré de certitude d'un traitement valable, est généralement moins bon lorsque la perméabilité a tendance à décroître continuellement.

5-5 - INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DU BAIN SUR LA PERMEABILITE  
=====

DES BOBINES DE MECHE ET LA DISSOCIATION FIBREUSE  
=====

La connaissance de la dissociation fibreuse résultant d'un traitement chimique, est indispensable à la prévision du comportement de la matière en filature (35, 36). Pour estimer le taux de dissociation fibreuse, on a coutume de mesurer la résistance à l'étirement de la mèche traitée à différents écartements (36), et il a été possible, à l'aide de comparaisons multiples effectuées sur une longue période, de définir expérimentalement un intervalle de résistance à l'étirement propice à un filage convenable.

Or, il s'avère que le blanchiment industriel à l'eau oxygénée, couramment pratiqué selon la formule ci-après ;

- débouillissage au carbonate à 20 g/l, 1 heure à 90°C.
- puis blanchiment à l'eau oxygénée en milieu alcalin, 2 heures de 30 à 90° C,

conduit à une résistance à l'étirement très faible, lorsqu'il s'agit de matières de 1976.

C'est pour essayer de réduire ce taux de dissociation et conséquemment d'améliorer les conditions de filage que nous avons entrepris l'étude de plusieurs températures, dont les résultats sont présentés ci-après.



a) L'utilisation de soude a été définitivement écartée et nous avons effectué sur les bobines de mèche de la matière 1976 définie au § 5-4-a, 3 traitements au carbonate de sodium à 20 g/l, chacun d'eux se différenciant par la température :

- 90°C durant une heure
- 60°C " " "
- 30 à 60°C durant 1/2 H et maintien 1/2 H à 60° C.

b) Evolution du pH du bain (voir Fig. 42) L'allure des courbes est à peu près la même dans les 3 cas :

- à 60°C le pH décroît un peu moins qu'à 90°C.
- au cours du traitement en montée progressive de température, le pH évolue moins que le précédent, au début (c'est-à-dire à froid), mais il est le même en fin de traitement.

Les légères différences d'évolution du pH d'un traitement à l'autre, correspondent aux différences d'action de l'alcali sur les substances non-cellulosiques du lin en fonction de la température.

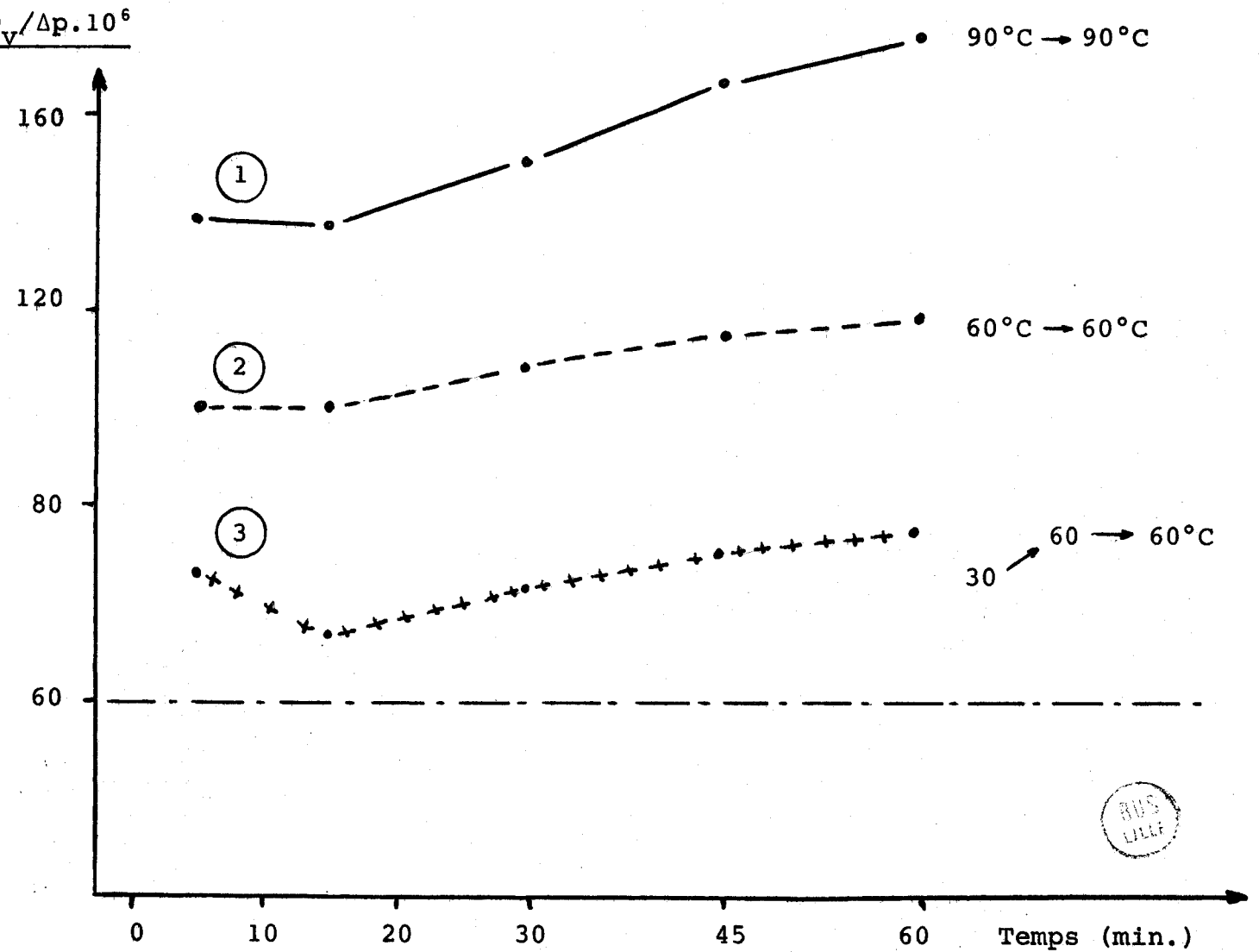
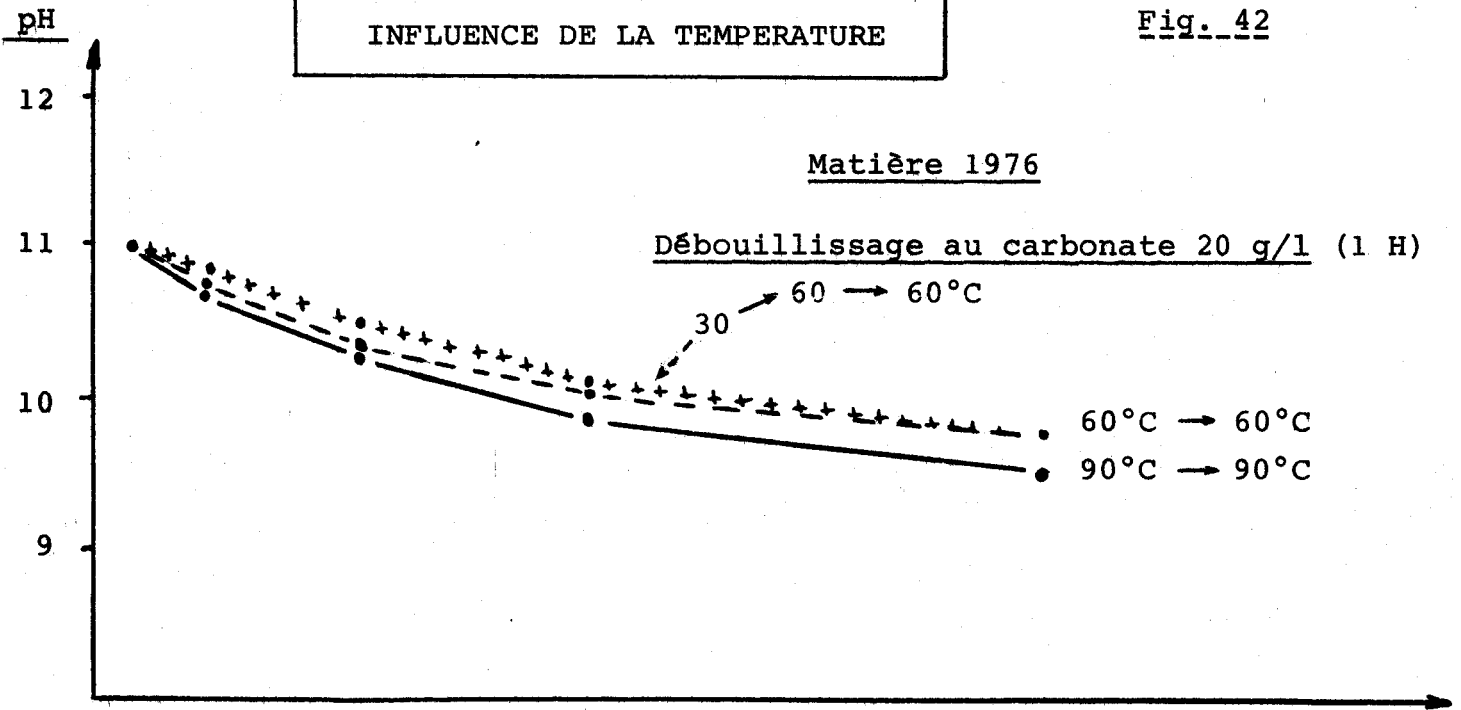
c) Influence de la température sur la perméabilité (Fig. 42)

Les positions respectives des courbes "90°C constant" et "60°C constant" s'expliquent très bien par la différence de viscosité du fluide due à la température : c'est "l'effet 3" signalé au § 5-3-a. Les formes de ces 2 courbes sont les mêmes et font ressortir que déjà, à 5 minutes de circulation, "l'effet 1" de gonflement se trouve masqué par "l'effet 4" de tassement des fibres dans la mèche.

En montée progressive de température (courbe 3), les effets "1" et "4" sont bien perçus, l'effet "4" devenant prédominant à partir de 15 minutes. Le retard relatif de ces 2 effets, par rapport aux courbes précédentes est tout à fait normal ; il est dû à la température plus faible en début de traitement.

PERMEABILITE DE BOBINES DE MECHE  
INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

Fig. 42



Par contre, ce qui est plus surprenant à priori, c'est l'écart de perméabilité entre les traitements (2) et (3), dans l'intervalle de 30 à 60 minutes, c'est-à-dire à température égale (60°C). Nous essayerons de l'expliquer par la connaissance du "diamètre" de la mèche après traitement ou en cours de traitement, la mesure de ce "diamètre" étant effectuée dans les conditions précisées au § 5-3-d. On peut remarquer au tableau 24 qu'en cours de traitement et après traitement, le "diamètre" de la mèche référencée (3) est systématiquement plus grand que celui de la mèche référencée (2). La mèche (2) est donc moins poreuse que la mèche (3) et comme la porosité globale peut être considérée comme la même dans les 2 cas, il y a plus d'espaces entre spires de mèche dans le cas (2) (voir Fig. 43), ce qui entraîne un débit volumique plus important. Mais cela ne signifie pas que le traitement est forcément meilleur car le bain passe préférentiellement entre les spires et relativement peu à l'intérieur de la mèche entre les fibres. Il ne faut donc pas écarter systématiquement le traitement (3) sous prétexte que le débit volumique est le plus faible.

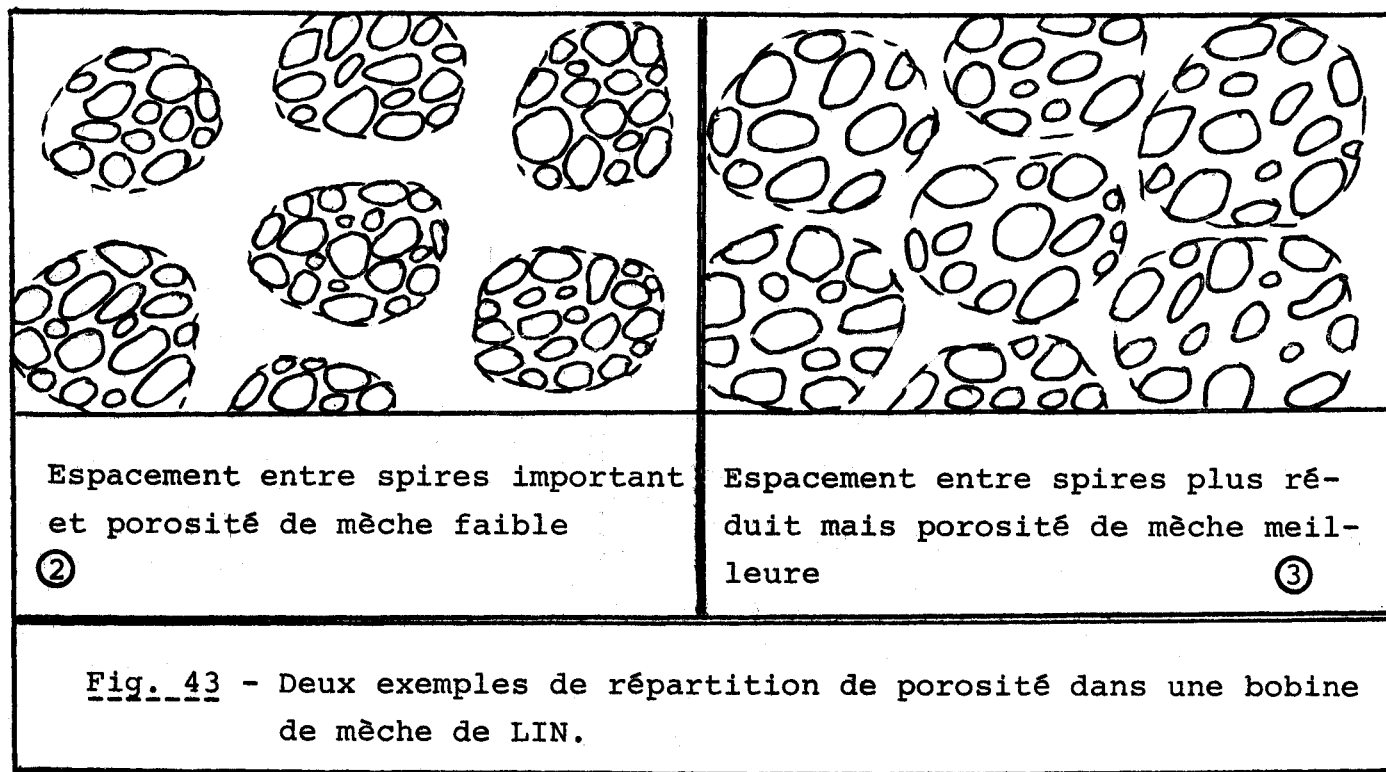
EVOLUTION DU "DIAMETRE" DE LA MECHE (mm)  
AU COURS DU TRAITEMENT.

Tableau 24

	état initial	à 5 min. de circul.	à 60 min. de circul.	à l'état séché
trait. 1 - 90°C constant	1,98	1,42	1,39	1,16
trait. 2 - 60°C constant	1,98	1,36	1,33	1,28
trait. 3 - montée 30-60°C maintien 60°C	1,98	1,56	1,47	1,33

d) Influence de la température sur la résistance à l'étirement de la mèche traitée.

Les courbes présentées à la Fig. 44 pourraient se passer d'explications tant elles sont parlantes. Formulons néanmoins quelques remarques en guise d'interprétation.



- Les traitements (1), (2) et (3) sont de simples débouillissages. Industriellement ils sont suivis d'un blanchiment à l'eau oxygénée en milieu alcalin (pH = 10,5) durant 2 heures, la température passant progressivement de 30 à 90°C. Ceci a pour effet d'accroître la dissociation ; on peut s'en rendre compte en observant comparativement les courbes (2) et (2) + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

- Le traitement (2) suivi du blanchiment industriel, fournit une courbe qui se situe dans la zone acceptable ; il peut donc être retenu.

- Le traitement (1) déjà trop dissociant par lui-même, doit être écarté car le blanchiment subséquent va encore réduire la résistance à l'étirement d'environ 200 g. On comprend alors pourquoi les premiers traitements industriels pratiqués à 90°C sur la matière 1976 et mettant en oeuvre les procédés utilisés les années précédentes, ont conduit à des résultats décevants au niveau de la filature.

- Les traitements (2) et (3) ont été transposés industriellement et suivis du blanchiment classique à l'eau oxygénée. Leur application a permis de réduire le taux de casses de fil de 25 à 50 %.

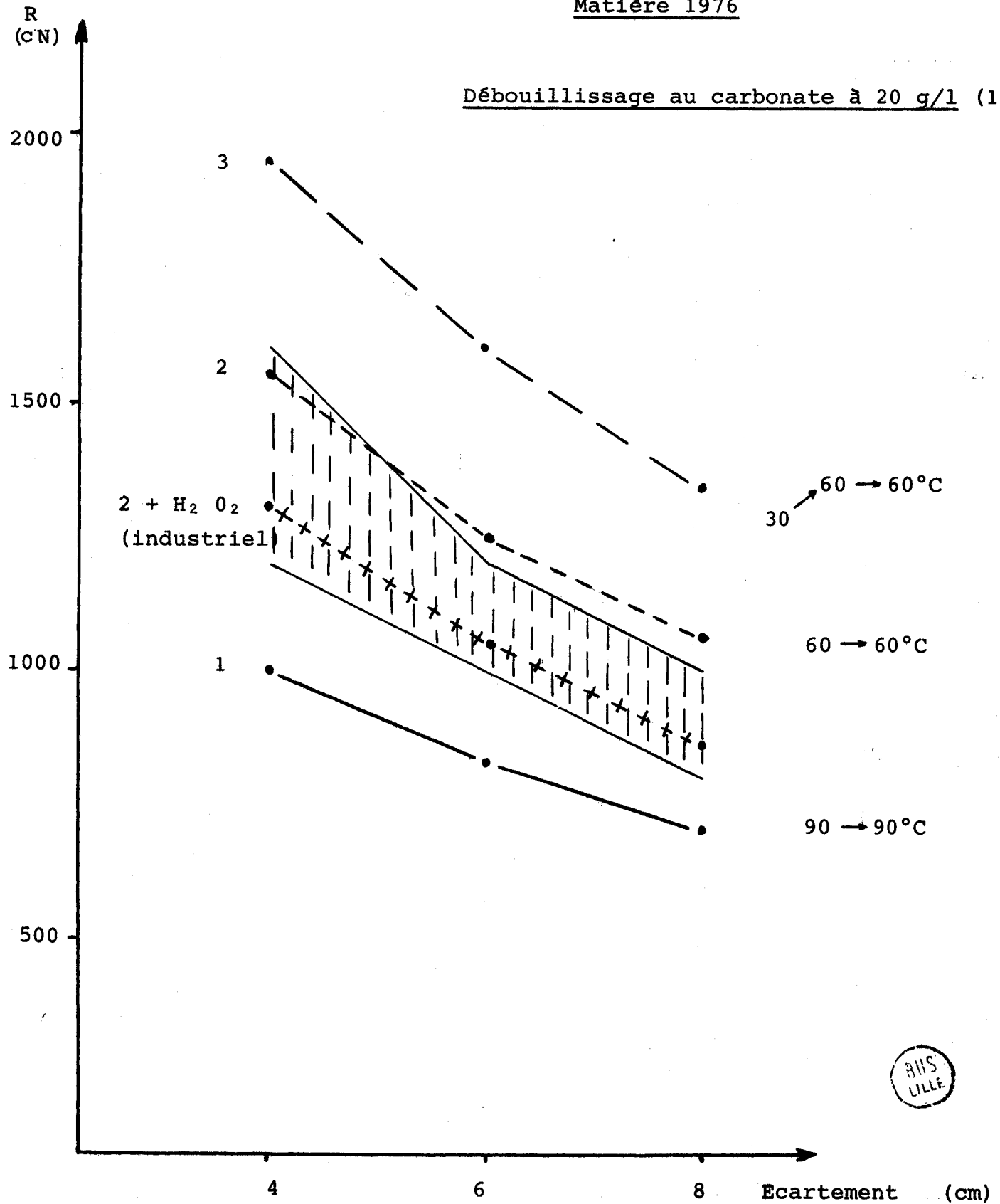
Finalement, c'est le traitement (3) qui a été retenu en raison de son action plus douce.

RESISTANCE A L'ETIREMENT DE MECHEs TRAITÉES  
INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

Fig. 44

Matière 1976

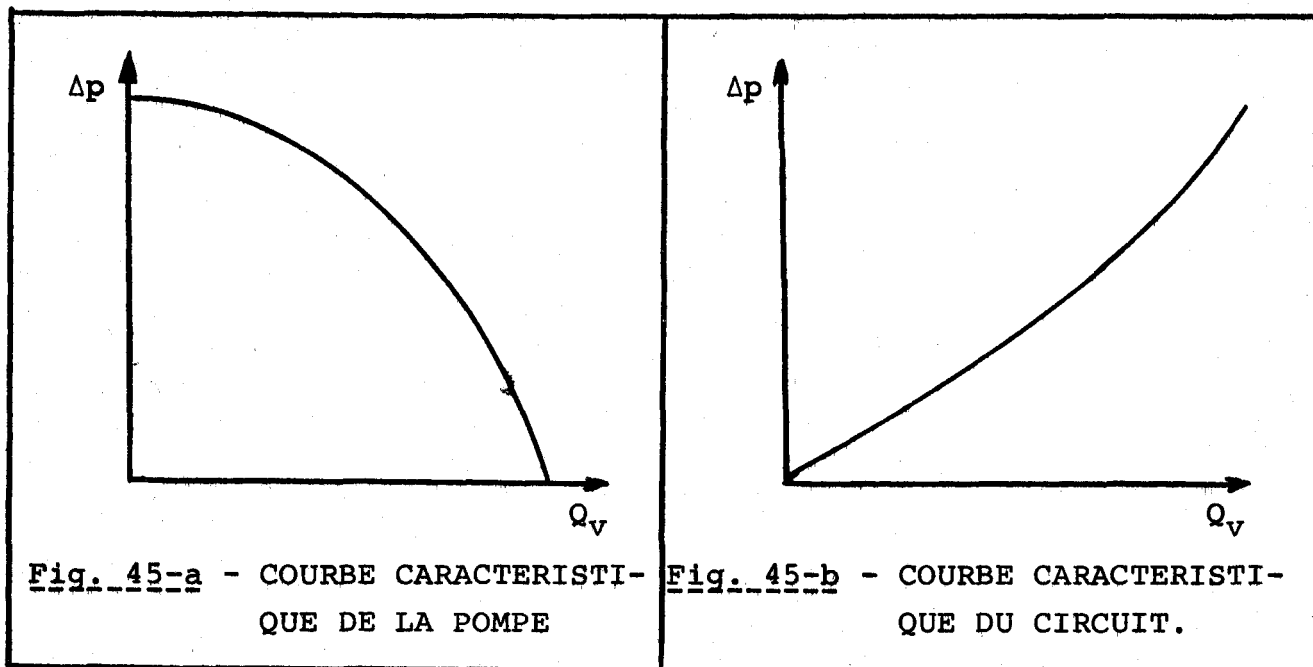
Débouillissage au carbonate à 20 g/l (1 H)



5-6 - INFLUENCE DU DEBIT SUR L'EFFICACITE DU TRAITEMENT DE  
=====

BLANCHIMENT - CAS DE LA MECHE DE LIN.  
=====

Au cours des travaux présentés aux § 5-3, 5-4 et 5-5, on a obtenu pour un même dispositif expérimental et par conséquent pour une même pompe, différents débits volumiques correspondant à différentes perméabilités. En d'autres termes, ce sont les facteurs inhérents au tampon fibreux et au fluide, qui ont engendré les variations de débit, la pompe donnant "ce qu'elle pouvait" et conservant toujours la même courbe caractéristique ; dans ce cas (voir Fig. 45-a), la perte de charge croît lorsque décroît le débit.



A présent, dans une même série d'essais, l'emballage textile aura toujours les mêmes caractéristiques de porosité, dimensions, texture, nature de la fibre..., le fluide sera toujours le même, mais on modifiera le débit volumique en agissant sur les possibilités de la pompe, plus exactement, en réglant le diaphragme "a" placé à la sortie de la pompe (voir Fig. 5). Dans ces conditions la perte de charge croît lorsqu'augmente le débit et la courbe obtenue qui est théoriquement une droite en régime laminaire, a pratiquement une forme arquée à concavité vers le haut (voir Fig. 45-b).

a) Matière première et appareillage.

Dans tous les cas, la matière textile est un lin normalement roui de 1970 présenté à l'état de mèche, sur bobinot en polypropylène à fût perforé, de format 10 x 5 1/2 pouces. La masse volumique apparente ( $\rho_a$ ) ou densité de renvidage est  $0,335 \text{ g/cm}^3$  ce qui correspond à une porosité globale initiale (à l'état sec) de  $\varepsilon = 0,76$ .

On a réalisé 2 séries d'essais :

- la série "L", utilisant le dispositif de laboratoire décrit au § 2-2 et 5-1. On y a pratiqué 5 réglages conduisant à des débits "moyens" compris entre 10 et  $100 \text{ cm}^3/\text{s}$ .
- la série "A", mettant en oeuvre un appareil commercialisé d'atelier-pilote de fabrication Barriquand. On y a également pratiqué 5 réglages conduisant à des débits "moyens" compris entre 25 et  $900 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

b) Traitements réalisés.

Il s'agit dans tous les cas, d'un blanchiment classique à l'eau oxygénée précédé d'un débouillissage alcalin au carbonate de sodium, selon la formule ci-après :

- débouillissage : carbonate 10 g/l 1 heure à  $90^\circ\text{C}$   
2 rinçages
- blanchiment : carbonate 4 g/l  
silicate 4 g/l  
eau oxygénée q.s. pour 1 volume/litre  
montée progressive de 25 à  $90^\circ\text{C}$  en 1 H 1/2  
3 rinçages

Dans chacune des 2 séries, on a blanchi 5 bobines, chaque traitement se différenciant par le débit obtenu au moyen de réglage judicieux, soit d'un diaphragme placé à la sortie de la pompe pour la série L, soit d'un by-pass pour la série A, ces réglages n'étant pas modifiés du début à la fin de chacune des passes de traitement.

c) Analyses effectuées.

On a mesuré essentiellement :

- le débit volumique ( $Q_v$ ) du bain traversant la bobine ;
- le degré de blanc ( $W_b$ ) du textile, avant et après traitement (37) ;
- le degré de polymérisation (D.P.) de la cellulose constitutive des éléments fibreux (38).

d) Résultats.

A la Fig. 46 a été représentée essentiellement l'évolution du débit volumique, au cours du blanchiment à l'eau oxygénée, l'étude du débouillissage ayant déjà été mentionnée ; nous y avons adjoint quelques valeurs de degré de blanc et de D.P. de la cellulose, de manière à montrer l'influence du débit sur ces paramètres.

1) Durant le traitement à l'eau oxygénée, le débit volumique n'est pas constant au cours du temps et l'on remarque deux formes de courbes très caractéristiques :

- Les 3 courbes supérieures de la série A ;
- Les autres courbes de la série A et celles de la série L.

Les courbes de la première famille se rencontrent pour des débits relativement élevés et la pente est d'autant plus importante que le débit est plus élevé.

Les courbes de la seconde famille qui ont des formes très voisines, présentent un minima vers 70-80°C, avec souvent une remontée vers 85-90°C, la partie décroissante étant d'autant plus prononcée que le débit volumique moyen est plus faible.

On peut essayer d'expliquer ces deux familles de courbes par les deux phénomènes suivants :

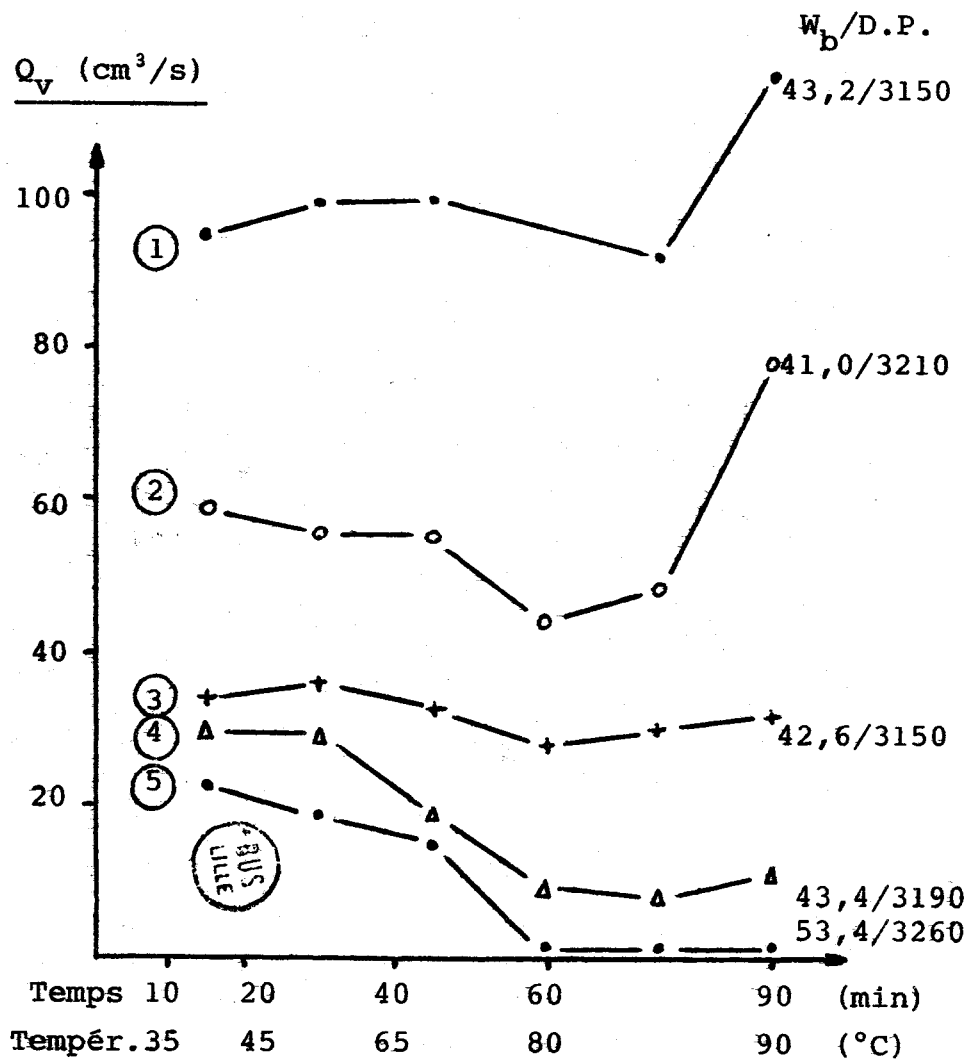
- au cours du temps, la température augmente et conséquemment la viscosité du bain diminue d'où il résulte un accroissement de la perméabilité.



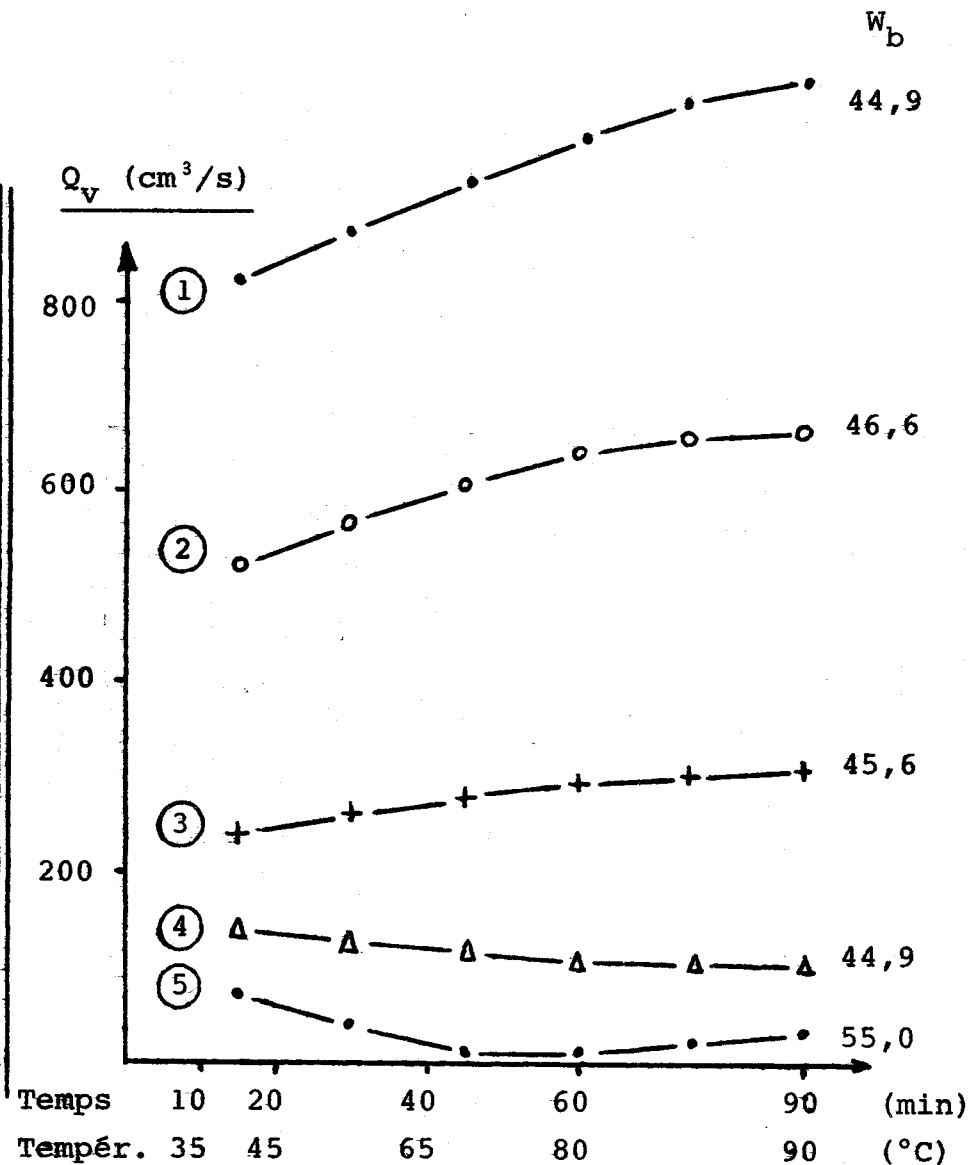
BLANCHIMENT A L'EAU OXYGENEE DE MECHE DE LIN  
EVOLUTION DU DEBIT ET SON INFLUENCE SUR LE DEGRE DE BLANC

Fig. 46

Série "L" (Laboratoire)



Série "A" (Atelier)



- il y a vraisemblablement un phénomène de cavitation lié à la tension de vapeur et particulièrement prononcé à chaud, à une certaine température.

Quant au gonflement de la fibre et à la réduction de section de la mèche, il n'y a pas lieu d'en retenir les effets puisqu'ils se sont produits au cours du débouillissage préalable.

Les 2 phénomènes cités ci-dessus se superposeraient donc et leurs intensités respectives seraient différentes selon le débit. Lorsque le débit est élevé, le phénomène de cavitation serait masqué par la pression importante exercée par la pompe alors qu'il serait prédominant lorsque la pression en amont est faible.

2) Si l'on examine comparativement les différentes courbes d'une même série, on s'aperçoit que dans un certain intervalle qui est d'ailleurs très grand, le débit volumique du bain d'eau oxygénée, a très peu d'influence sur le degré de blanc obtenu.

En série L, on enregistre pratiquement le même degré de blanc pour des débits moyens allant de 18 à 100 cm<sup>3</sup>/s. Toutefois, le traitement 4 a conduit à quelques irrégularités de nuance. Quant au résultat moins bon obtenu en traitement 5, il faut en rechercher la cause dans le débit presque nul enregistré pendant 1/2 heure entre les températures 80 et 90°C.

En série A, on obtient pratiquement le même degré de blanc quand le débit moyen passe de 100 à 900 cm<sup>3</sup>/s. Le résultat est moins satisfaisant lorsque le débit moyen tombe à 25 cm<sup>3</sup>/s, mais ici encore, cela peut être dû au fait que le débit a été pratiquement nul entre les températures 65 et 80°C. En regroupant les deux séries qui ont été réalisées avec la même matière présentée de façon identique, on s'aperçoit qu'on obtient le même degré de blanc, lorsque le débit moyen varie de 30 à 900 cm<sup>3</sup>/s (rapport de 1 à 30).

Il n'est donc pas indispensable dans le cas du blanchiment du lin de pratiquer des débits très élevés pour obtenir un traitement efficace. Il est même capital de souligner qu'une augmentation

trop importante de débit pour une même porosité d'empaquetage textile présente 2 inconvénients majeurs :

- un accroissement très net de la perte de charge, ce qui peut entraîner des déformations de la masse fibreuse,
- une consommation abusive d'énergie qui, théoriquement, est proportionnelle à l'expression  $Q_v \times \Delta p$ .

Remarque.

Si la non-influence du débit volumique du bain sur le degré de blanc final, dans un certain intervalle, peut être généralisée et transposable industriellement, il n'en est pas de même du seuil critique. On peut même penser que des tests répétés en labo ou en atelier expérimental ne permettraient pas de le définir valablement, car il est vraisemblable qu'il soit très dépendant de la texture de l'empaquetage textile et de la structure interne de l'élément fibreux. Si l'on reprend les deux exemples de porosité représentés à la Fig. 43, à débit global égal, l'efficacité et la régularité du traitement seraient meilleures dans le cas (3) que dans le cas (2).

Le rôle du blanchisseur et à fortiori celui du teinturier sont donc particulièrement ingrats puisqu'il s'agit de traiter toutes sortes de supports variables en dimension, porosité et nature de fibre, différents d'un client à l'autre, d'une fabrication à l'autre et parfois même à l'intérieur du propre lot.

Fort heureusement, le fait que le degré de blanc ne varie pratiquement pas dans un grand intervalle de débit, fournit une sécurité au façonnier qui préfère très souvent se situer bien au delà du seuil critique.

Chapitre VI

MESURE DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT DU FLUIDE DANS  
UN EMPAQUETAGE TEXTILE

A côté de la détermination du débit volumique global à travers un emballage textile, il a paru souhaitable de connaître et même de mesurer la vitesse d'écoulement du fluide, pour de nombreuses raisons dont les suivantes :

- les mesures habituelles fournissent un débit en tuyauterie et le débit réel traversant la masse fibreuse peut être notablement plus faible en raison des fuites possibles en haut ou en bas de colonne, entre bobines...
- le débit est global et on ne connaît pas les variations entre bobines et à l'intérieur d'une même bobine.
- la connaissance simultanée du débit volumique et de la vitesse de circulation du fluide doit permettre une détermination de la porosité de l'emballage textile dans les conditions mêmes du traitement, comme nous le montrerons au § 6-4.

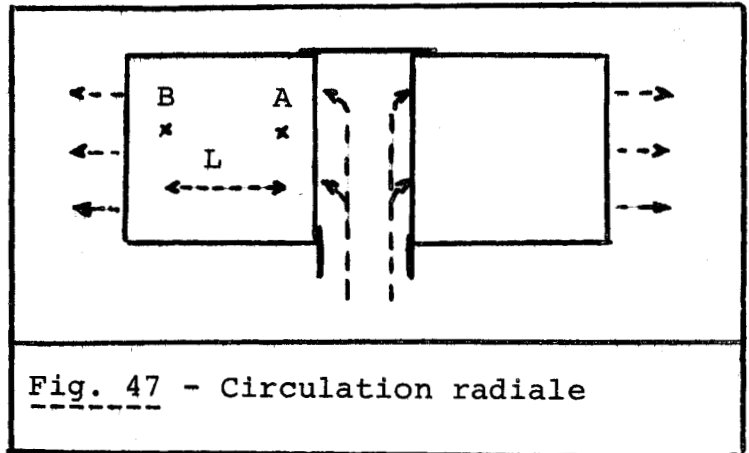
6-1 - PRINCIPE DE LA MESURE.

=====

La mesure est basée sur le transfert de la chaleur par la circulation du liquide, la vitesse de rayonnement thermique pouvant être considérée comme négligeable à côté de la vitesse d'écoulement du fluide.

Au temps  $t_0$ , on émet en un point A de l'empaquetage fibreux, une quantité de chaleur assez importante pendant un temps bref (voir Fig. 47)

Au point B situé plus en aval et à une distance L de A, on enregistre le temps  $t_1$  à partir duquel on commence à percevoir une augmentation de température.



Dans l'hypothèse d'un cheminement rectiligne, la vitesse d'écoulement du liquide serait donné par la relation :

$$v_0 = \frac{L}{t_1 - t_0} \quad (26)$$

En réalité, le parcours du fluide est plus ou moins sinueux, et la valeur de  $v_0$  est un peu plus petite que la vitesse réelle du fluide. T désignant la tortuosité, on aurait :

$$\bar{v} = T.v_0 = \frac{L.T}{t_1 - t_0} \quad (27)$$

#### 6-2 - DISPOSITIF DE MESURE. =====

Si le principe de la mesure paraît simple, la réalisation du dispositif expérimental l'est certes moins. Nous avons rencontré un certain nombre d'ennuis parmi lesquels : difficulté de produire un front thermique étroit, intense et bref ; réalisation de sondes pénétrant aisément dans l'empaquetage fibreux sans détériorer l'émetteur, le récepteur ni les conducteurs ; recherche d'une cellule de réception suffisamment sensible ; difficulté de produire et d'enregistrer un signal pur exempt de parasites.

Le dispositif expérimental actuel nécessite encore bien des améliorations au niveau technologique, notamment son adaptation à tout type d'empaquetage textile ; mais il s'agit là d'une mise au point importante qui dépasse le cadre de notre travail. Nous nous

sommes limités à vérifier le principe de la méthode sur un seul type de présentation : la bobine de fil de lin destinée au blanchiment. Dans ce cas, le dispositif expérimental fournit toute satisfaction ; il comprend essentiellement 2 parties (voir Fig. 48) :

- le circuit d'émission de l'énergie calorifique ;
- le circuit de réception de la variation de température.

a) Circuit d'émission.

L'organe principale est la sonde réalisée en inox ; elle est effilée à son extrémité pour permettre sa pénétration dans la bobine. Elle comporte une fenêtre où vient se loger la résistance ou source calorifique constituée par un filament de nickel-chrome. Les conducteurs isolés sont noyés dans des saignées pratiquées dans le métal.

Le générateur est une batterie d'accumulateurs de f.é.m. maximale 12 volts. Un dispositif approprié permet de fermer le circuit pendant 2/5 seconde, un signal étant simultanément transmis à l'enregistreur.

b) Circuit de réception.

L'armature de la sonde de réception est similaire à celle de la sonde d'émission.

Dans la fenêtre est située une thermistance, plus exactement une petite perle CTN (résistance à coefficient de température négatif) d'environ 0,5 mm de diamètre, reliée à un pont de Wheastone alimenté en continu.

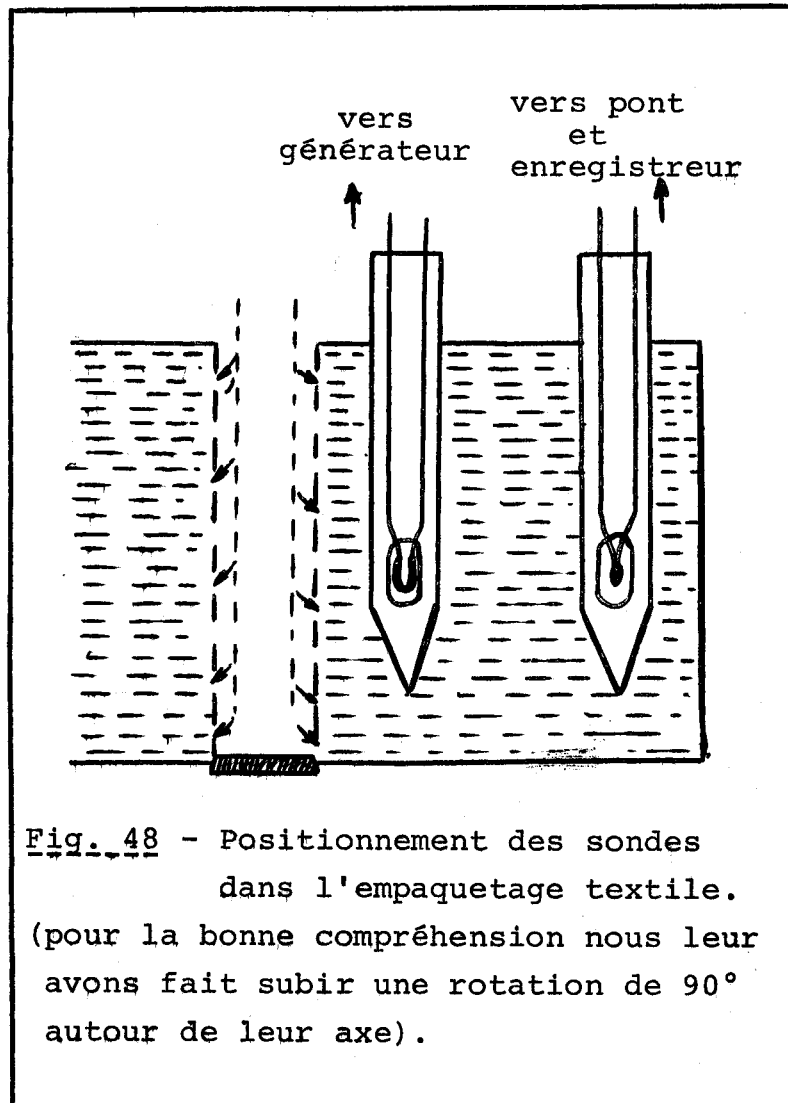


Fig. 48 - Positionnement des sondes dans l'emballage textile. (pour la bonne compréhension nous leur avons fait subir une rotation de 90° autour de leur axe).

On effectue le zéro électrique juste avant la mesure, c'est-à-dire juste avant de fournir l'énergie calorifique. Lorsque le front thermique parvient à la thermistance, il en résulte un déséquilibre du pont qui est détecté par un enregistreur sensible.

6-3 - EXPLOITATION DU DIAGRAMME.

=====

Le diagramme enregistré est du type de celui de la Fig. 49.

Le point A correspond à la fermeture du circuit de chauffe et le point B à l'ouverture de ce circuit. Le point C correspond au moment à partir duquel, la thermistance est soumise à l'élévation de température.

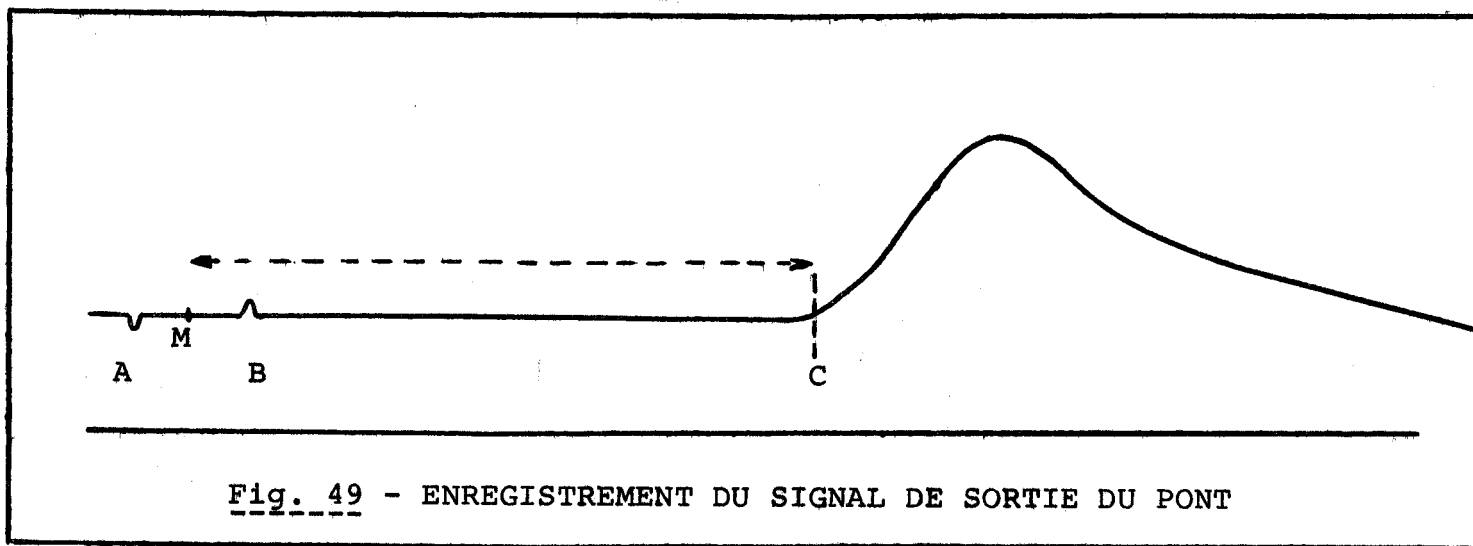


Fig. 49 - ENREGISTREMENT DU SIGNAL DE SORTIE DU PONT

Deux difficultés apparaissent dans l'exploitation de ce diagramme.

- Le départ du flux thermique correspond-il au temps zéro (fermeture du circuit de chauffe - point A) ou au temps 2/5 seconde (ouverture du circuit de chauffe - point B), ou à un temps intermédiaire ?

Pour interpréter nos premiers résultats, nous avons considéré le départ du flux thermique au temps 1/5 seconde, c'est-à-dire au point M (milieu du segment AB). Des interprétations ultérieures permettront sans doute de vérifier ou d'infirmer le bien-fondé de cette prise de position.

- Une seconde difficulté consiste à saisir avec précision, la position du point C. Cela est lié en partie au démarrage franc et à la pente de la courbe ascendante du diagramme. On parvient à des conditions de travail valables en choisissant des thermistances très sensibles, en jouant sur la sensibilité de l'enregistreur, en adoptant une vitesse de déroulement du papier assez élevée (jusqu'à 10 cm/s), en positionnant convenablement les sondes l'une en face de l'autre dans la direction de la veine fluide, et aussi et surtout, en évitant d'introduire dans le signal, toute perturbation déformant la courbe d'enregistrement.

Si  $t$  est le temps mis par le papier diagramme pour parcourir  $MC$ ,

et  $L$  l'entr'axe des 2 sondes dans la bobine,

$$\text{on a : } v_0 = \frac{L}{t} \quad (28)$$

#### 6-4 - ESTIMATION DE LA SECTION DES INTERSTICES ET DE LA POROSITE.

=====

La porosité initiale globale (à l'état sec) peut aisément être déterminée à partir de la géométrie de l'emballage textile.

Lorsque la fibre gonfle en milieu aqueux, cette porosité varie au cours du traitement et nous avons déjà présenté en Annexe 5, un moyen de l'estimer par perméamétrie.

Nous proposons à présent une méthode toute différente devant permettre de déterminer la porosité de l'emballage fibreux, dans les conditions mêmes du traitement, et nous étudierons essentiellement la circulation radiale puisque c'est pratiquement la seule qui soit appliquée industriellement.

Soit un milieu poreux cylindrique de porosité homogène et dans celui-ci, une surface également cylindrique  $S$  (voir Fig. 50) traversée radialement par le fluide.

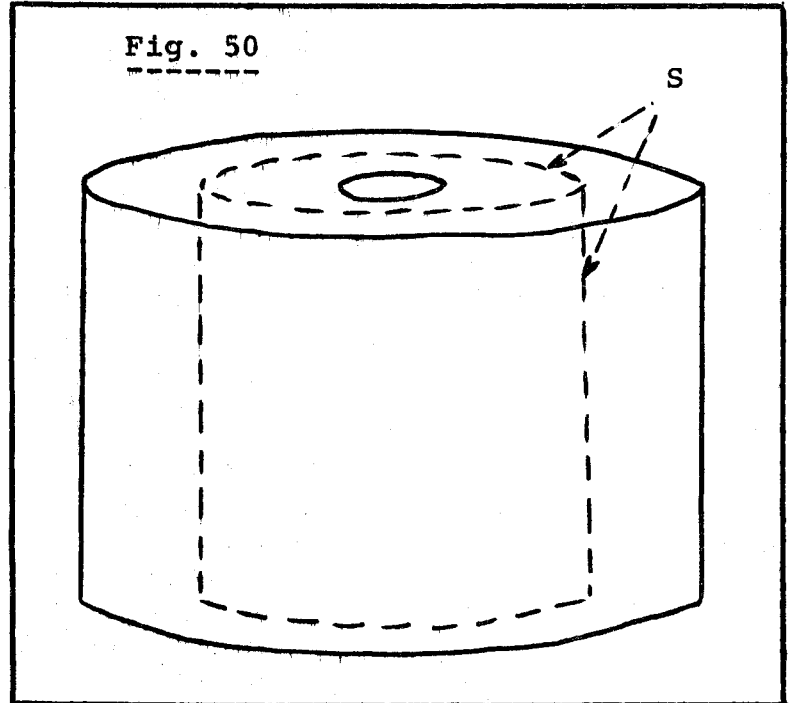


Appelons :

$Q_v$  le débit volumique,  
 $S_i$  la somme des sections  
 des interstices sur la  
 surface  $S$ .

$S'_i$  la somme des sections  
 des interstices, en cou-  
 pe perpendiculaire à la  
 direction de déplacement  
 du fluide au droit de la  
 surface  $S$ .

$v$  la vitesse instantanée  
 au niveau de la surfa-  
 ce  $S$ .



(On supposera que  $v$  est constant en tout point de la sur-  
 face  $S$ , mais il reste, bien entendu, admis que  $v$  varie radialement et  
 en fonction inverse du diamètre du cylindre de surface  $S$ ).

Par définition, le débit volumique s'exprime :

$$Q_v = v \cdot S'_i = \frac{v \cdot S_i}{T} \quad (29)$$

Si maintenant  $\bar{v}$  est la vitesse moyenne entre 2 points  
 A et B, telle qu'elle a été définie au § 6-1 ; si  $r_1$  est le rayon  
 correspondant au point A,  $r_2$  le rayon correspondant au point B et  
 $t$  le temps mis par le fluide pour aller de A à B (voir Fig. 51)

$$\text{on a } v_0 = \frac{r_2 - r_1}{t} \quad \text{et} \quad \bar{v} = \frac{T (r_2 - r_1)}{t} \quad (30)$$

A présent, la relation (29) devient :  $S^*_i = \frac{Q_v \cdot T}{\bar{v}}$  (31)

$S^*_i$  représentant l'aire totale des sections des interstices sur une  
 surface imaginaire  $S^*$ .

Essayons de positionner  $S^*$  par rapport à A et B et  
 soient  $R$  le rayon du cylindre de surface  $S^*$  et  $H$  sa hauteur.

$$S^* = 2 \pi, R, H$$

et si  $\epsilon$  est la porosité,

$$S^*_i = 2 \pi, R, H, \epsilon \quad (32)$$

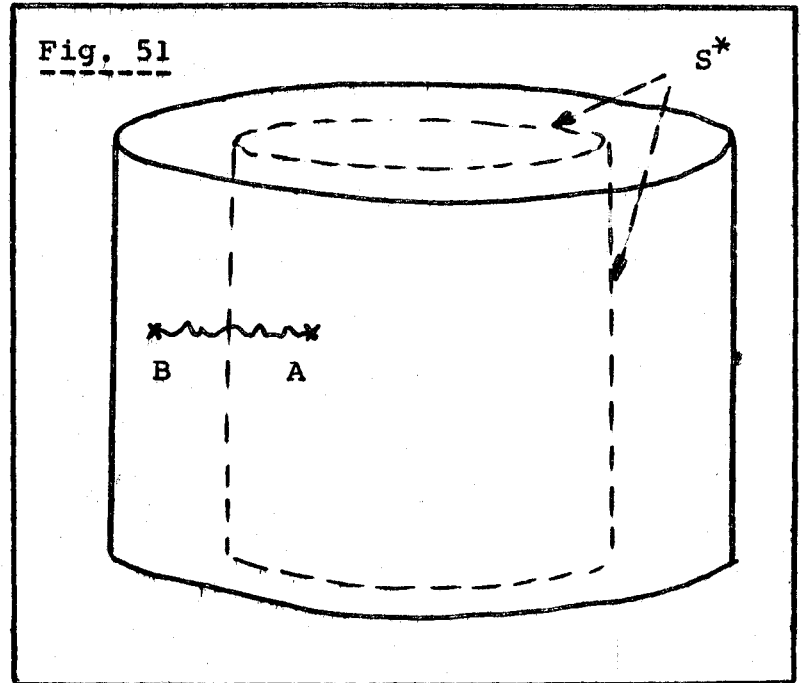
$$Q_v = \frac{V}{t}$$

V étant le volume de fluide s'écoulant dans le manchon cylindrique ayant pour rayons intérieur et extérieur, respectivement  $r_1$  et  $r_2$ .

Le volume de ce manchon est donc

$$\pi H (r_2^2 - r_1^2)$$

$$\text{et } V = \epsilon, \pi, H (r_2^2 - r_1^2).$$



(33)

L'association des relations (30), (31) et (40) conduit à

$$S^*_i = \frac{Q_v, T}{\bar{v}} = \frac{V, T, t}{t, T (r_2 - r_1)} = \frac{\epsilon, \pi, H, (r_2^2 - r_1^2)}{r_2 - r_1}$$

$$\text{Il en résulte : } S^*_i = \epsilon, \pi, H (r_2 + r_1) \quad (34)$$

De l'égalité des relations (32) et (34), on déduit finalement :

$$R = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

La surface cylindrique  $S^*$  passe donc par le milieu du segment AB.

La mesure de  $Q_v$  et celle de  $\bar{v}$  (ou plus exactement  $v_0$ ) fournissent la valeur de  $S^*_i$ . Le positionnement de la surface  $S^*$  permet d'en calculer son aire. Il est alors aisé d'en déduire la porosité par la relation de définition :

$$\epsilon = \frac{S^*_i}{S^*}$$

## C O N C L U S I O N

-----

Par une série de tests effectués sur des fibres qui ne gonflent pas en milieu aqueux, on a pu montrer que le modèle de KOZENY-CARMAN couramment appliqué aux masses poreuses, est également valable dans le cas de tampons fibreux à condition que les valeurs de nombre de Reynolds soient petites. Les nombres de Reynolds critiques se situent entre 1 et 10 et sembleraient dépendre de la viscosité du fluide. Au-delà de ces valeurs, la perte de charge ( $\Delta p$ ) augmente très vite et est bien supérieure à celle qu'on pourrait théoriquement établir. C'est ce qui a fait dire à de nombreux chercheurs que la "constante" de KOZENY "varie" avec la porosité ; en réalité, elle varie avec bien d'autres facteurs et nous pensons, dans ce cas, qu'il vaut mieux admettre que le modèle n'est pas applicable.

Mais nous avons également étudié le comportement des fibres de lin, les phénomènes étant alors plus nombreux et plus complexes. Deux faits essentiels ont été mis en évidence : le gonflement en milieu aqueux est important, très rapide et peu dépendant de la température ; le gonflement en milieu alcalin est très variable d'une matière à l'autre ; cette constatation a permis d'orienter dans de bonnes conditions le traitement de la mèche de lin 1976.

En bourre de fibres, la perméabilité au cours du temps serait influencée par trois facteurs dont le premier est de loin le plus important : le gonflement de l'élément fibreux, la perte de masse de la matière textile due au passage en solution de substances non-cellulosiques, une légère augmentation de la viscosité du bain. En bobines de mèche à spires jointives, un quatrième facteur très important doit être considéré : c'est la diminution de section de la mèche, au cours du temps, qui donne plus d'importance aux espaces entre spires et augmente la perméabilité globale. Ces quatre facteurs interviennent lors du traitement ; des essais comparatifs laboratoire/industrie ont permis de définir un débit volumique minimal en-deçà duquel il est difficile de garantir l'efficacité et la régularité du blanchiment industriel de la mèche de lin. Toutes choses égales

par ailleurs, une présentation en bobine (c'est-à-dire organisée), conduit à une perméabilité spécifique plus faible qu'une présentation en bourre. Cela serait dû à la présence "d'espaces morts" dans le premier cas.

En mèche de lin destinée à la filature au mouillé, il est capital de connaître la dissociation fibreuse après traitement chimique, celle-ci conditionnant pour une large part, le comportement de la matière en filature. Nous avons mis au point un appareil permettant non seulement de mesurer avec exactitude la perméabilité de tout emballage textile dans les conditions les plus diverses de pH et de température, mais aussi de réaliser tout type de traitement ou encore de déterminer le comportement de différentes matières à un traitement standard. La mèche ainsi traitée est soumise au test de résistance à l'étirement et l'on peut alors prévoir son comportement industriel tant en blanchiment qu'en filature, et éventuellement proposer le traitement le mieux approprié.

Enfin, nous avons mis en évidence que dans le cas de fibres gonflant en milieu aqueux, la perméabilité réelle de l'emballage textile varie souvent au cours du temps. Il est donc utopique de ne la mesurer qu'à un moment donné. C'est la "courbe de perméabilité" qui renseigne vraiment sur le comportement de la masse fibreuse au cours du traitement.

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES

<u>Notation</u>	<u>Désignation</u>	<u>Dimension</u>
d	diamètre d'une fibre supposée cylindrique	L
d <sub>h</sub>	diamètre hydraulique d'une conduite ou d'un pore	L
D	diamètre intérieur d'une conduite ou d'un pore supposé cylindrique	L
D <sub>e</sub>	diamètre équivalent d'une conduite ou d'un pore	L
∅	diamètre d'un tampon fibreux	L
∅E	diamètre extérieur d'un emballage fibreux cylindrique	L
∅I	diamètre intérieur d'un emballage fibreux cylindrique	L
g	accélération de la pesanteur	L.T <sup>-2</sup>
h <sub>K</sub>	constante de KOZENY	sans
H	hauteur d'un emballage fibreux cylindrique	L
k, k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub> , ..	une constante définie dans le texte où elle est présentée	
K <sub>S</sub>	perméabilité spécifique d'un milieu	L <sup>2</sup>
K <sub>t</sub>	perméabilité totale d'une masse poreuse	M <sup>-1</sup> .L <sup>4</sup> .T
L	longueur traversée par le fluide, ou épaisseur de la couche, ou longueur du tampon fibreux	L
L'	longueur d'un interstice dans le tampon fibreux de longueur L	L
m	masse d'une quantité définie de fibres ou de particules	M
Δp	perte de charge ou différence de pression entre l'amont et l'aval	M.L <sup>-1</sup> .T <sup>-2</sup>
Δp <sub>f</sub>	perte de charge relative au tampon fibreux seul	M.L <sup>-1</sup> .T <sup>-2</sup>
Δp <sub>c</sub>	perte de charge relative à la cellule de mesure et aux canalisations	M.L <sup>-1</sup> .T <sup>-2</sup>
Q <sub>v</sub>	débit volumique du fluide, du liquide, du bain...	L <sup>3</sup> .T <sup>-1</sup>
R	résistance totale opposée par un tampon fibreux, au passage du fluide	M.L <sup>-4</sup> .T <sup>-1</sup>
R <sub>s</sub>	résistance spécifique locale d'un milieu	L <sup>-2</sup>
r	rayon d'une conduite ou d'un pore supposé cylindrique	L
S	section traversée par le fluide	L <sup>2</sup>
S <sub>1</sub>	somme des sections des interstices dans un tampon fibreux, en plan de coupe perpendiculaire à l'axe du tampon	L <sup>2</sup>

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES (suite)

<u>Notation</u>	<u>Désignation</u>	<u>Dimension</u>
$S'_i$	somme des sections des interstices dans un tampon fibreux, en plan de coupe perpendiculaire à la direction de déplacement du fluide.	$L^2$
$S$	surface totale extérieure des interstices dans tampon fibreux	$L^2$
$Re$	nombre de Reynolds	sans
$T$	tortuosité d'un pore ou d'un interstice	sans
$T_d$	titre en denier d'une fibre	$M.L^{-1}$
$t$	temps	$T$
$u$	désigne quelquefois une vitesse (on lui préfère "v")	$L.T^{-1}$
$v$	vitesse instantanée du fluide en un endroit donné du tampon fibreux	$L.T^{-1}$
$\bar{v}$	vitesse moyenne du fluide à travers le tampon fibreux	$L.T^{-1}$
$V$	volume défini dans le texte ou il est présenté	$L^3$
$V_t$	volume du tampon fibreux	$L^3$
$V_f$	volume total des fibres dans le tampon fibreux	$L^3$
$\gamma$	facteur de non-circularité	sans
$\epsilon$	porosité du tampon fibreux	sans
$\eta$	viscosité dynamique du fluide	$M.L^{-1}.T^{-1}$
$\lambda$	coefficient de perte de charge	sans
$\nu$	viscosité cinématique du fluide	
$\rho$	masse volumique du fluide de circulation	$M.L^{-3}$
$\rho_f$	masse volumique des fibres	$M.L^{-3}$
$\rho_a$	masse volumique apparente d'un tampon fibreux ou d'un emballage textile	$M.L^{-3}$
$\sigma$	surface spécifique des particules ou des fibres	$L^{-1}$
$\theta$	température en degrés Celsius	deg.

B I B L I O G R A P H I E

- (1) - DAUTRICOURT A. - Revue Teintex, N° 11 (1971), pp. 769-776  
"Introduction à la teinture rapide en plein bain".
- (2) - CARBONELL J., WALLISER R., HASLER R.  
Revue Teintex, N° 2 (1973), pp. 73-81  
"Nouveaux aspects dans la teinture par circulation de bain".
- (3) - KRETSCHMER A. - Revue Teintex, N° 8 et 9 (1975)  
"Rendements plus élevés et sécurité plus grande au cours de la teinture dans les autoclaves à ensouples, grâce aux nouvelles connaissances de la mécanique des fluides".
- (4) - BEN AIM R. - Thèse - Université de Nancy (1970)
- (5) - DARCY H. - Editions V. Dalmont - PARIS  
"Les fontaines publiques de la ville de Dijon".
- (6) - HOUPEURT A. - Editions Technip. - PARIS (1974)  
"Mécanique des fluides dans les milieux poreux, Critiques et recherches".
- (7) - FANCHER G.H. - LEWIS J.A. - BARNES K.B. -  
1<sup>er</sup> Congrès mondial du pétrole Londres (1933)  
"Physical tests and properties of oil and gas sands".
- (8) - CHAVETEAU G. - Thèse Université de Toulouse (1965)  
"Essais sur la loi de Darcy et les écoulements laminaires à perte de charge non linéaire".
- (9) - CARMAN P.C. - Journal agric. sci. Vol 29 (1939) pp. 262-273  
"Permeability of saturated sands, soils and clays".
- (10) - WILLIE M.R. et GARNER G.H - World oil, Avril 1958, pp. 210-228  
"The generalized Kozeny-Carman equation. A novel approach to problems of fluid flow".
- (11) - LE LEC P. - Thèse, Université de Nancy (1971)  
"La filtration sur support ; études de l'extrapolation, de la compressibilité des gâteaux, de la migration des fines et de la sédimentation".

- (12) - LE GOFF P. et BEN AÏM R. - Cours de Génie chimique (1970)  
Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy  
"Mécanique des milieux poreux et dispersés".
- (13) - CLARENBURG L. et PIEKAAR - Chem. Engng. Sci. (1968) vol. 23  
pp. 765 et 773.
- (14) - KYAN C.P. - Ind. Engng Chem. Fund (1970) vol. 9, N° 4, p. 596
- (15) - DAVIES C.N. - Proc. Instn.Mech.Eng. (1952), 1B, 185
- (16) - ETIENNE A. - Cours de Chimie Industrielle  
Editions Riber, Paris (1966)  
"Manipulation des fluides"
- (17) - VOISIN E. et LOURD J. - Revue Fibra, Vol. 6, N° 1 (1961), pp. 1-17  
"Les dimensions de la fibre élémentaire de lin".
- (18) - JACQUEMART J. - Revue Fibra Vol. 6, N° 1 (1961), pp. 32-38.  
"Origine et croissance des fibres de lin".
- (19) - BONTE E. - Bulletin de l'I.T.F. - N° 125 (1966), pp. 609-640  
"Problèmes de rouissage liés à la filature de lin".
- (20) - GILLING D.R. et SAMUELS D.E.  
"La structure des faisceaux de fibres de lin".
- (21) - AFNOR - Norme française G. 07.074 (1970)  
"Méthodes perméométriques de détermination de la finesse des  
fibres de lin".
- (22) - DE MEULEMEESTER D., RAES G. et VROOMEN F.  
Annales Scient. Text. Belges, N° 3 (1958), pp. 33-69  
"Description d'un nouvel appareil Air-Flow. Son application  
au lin".
- (23) - mêmes auteurs. Annales Scient. Text. Belges, N° 2 (1959) pp. 41-62  
"La qualification scientifique du lin - 1<sup>ère</sup> partie".
- (24) - mêmes auteurs. Annales Scient. Text. Belges, N° 1 (1960) pp. 45-72  
"La qualification scientifique du lin - 2<sup>ème</sup> partie"



- (25) - AFNOR - Norme française G 07.059 (1968)  
"Essais des fibres - Méthode perméamétrique pour la mesure du diamètre moyen des fibres de laine".
- (26) - ANDERSON S.L. et WARBURTON F.L - Journal Tex. Inst. T749 (1949)  
"Effect of fiber orientation and use of plugs of randomized fibers."
- (27) BILLAUX P. - Editions J.-B. Baillière et Fils - Paris (1969)  
"Le lin. Sa vie, ses techniques, son histoire".
- (28) - MONROCQ R. Bull. Scient. de l'I.T.F., vol. 4, N° 15 (1975)  
pp 209-218.  
"Influences simultanées ou séparées de la densité de semis et de la variété sur certaines caractéristiques de la fibre élémentaire de lin".
- (29) - MONROCQ R. - Document I.T.F. - N° 8-76-70  
"Contrôle du diamètre moyen de la fibre élémentaire de lin".
- (30) - BEN AIM R. et LE GOFF P. - Powder technology, 2, (1968/69)  
pp. 169-174  
"Porosité des mélanges binaires de sphères et d'objets à symétrie cylindrique".
- (31) - BEN AIM R., LE GOFF P. et LE LEC P. - Powder technology, 5, (1971/72) pp 51-60  
"La perméabilité de milieux poreux formés par empilement de mélanges binaires de grains sphériques".
- (32) - MARSH P., MEROLA G. et SIMPSON M. - Textile Research Journal (1953), pp. 831-841.  
"Experiments with an alkali swelling-centrifuge test applied to cotton fiber".
- (33) - HOLTZINGER G. - Bulletin Scient. de l'I.T.F., vol. 3, N° 10 (1974), pp. 73-113.  
"Evaluation du gonflement de fibres cellulosiques selon une méthode originale de désorption non isotherme".
- (34) - COINTRE J. Cl. - Thèse Université de Paris (1972).  
"Contribution à l'étude des variations de structure de la cellulose du coton en milieu sodique".

- (35) - BONTE E. - Bulletin de l'I.T.F. - N° 116, (1965), pp. 23-61  
"Aspects nouveaux en filature de lin".
- (36) - BONTE E. - Bulletin de l'I.T.F. - N° 149, (1970), pp. 637-670  
"Etude du blanchiment du lin. Influence particulière du degré de rouissage".
- (37) - FARGUES A. et BONTE E. - Bulletin de l'I.T.F. - N° 111, (1964)  
pp. 249-264  
"Détermination pratique du degré de blanc des textiles à l'aide du spectrophotomètre. Essai de définition scientifique des standards de blanc".
- (38) - PARISOT A. - Revue Teintex, N° 8 (1962)  
"L'indice D.P., paramètre industriel de la cellulose".