

DA001/69
1969
rea

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Depuis

Electronique



PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Etude de la dispersion radiale dans un mélange binaire de
sphères en colonne noyée.

Jaz

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Etude de la dispersion radiale dans un mélange binaire de
sphères en colonne noyée.

SOUTENU LE 23 JUIN 1969 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN.

MEMBRES DU JURY

PRESIDENT

: M. COGNET

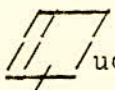
EXAMINATEURS

: MM. JAZ

DAGUENET

LECLERE

Par BELLIL H.
MEZIANE N.

 ue tous les professeurs ayant contribué à notre formation trouvent, dans le présent travail, l'expression de notre profonde reconnaissance. Nous remercions particulièrement Messieurs Cognet et Leclere pour la proposition du sujet et pour l'aide qu'ils nous ont apportée.

à nos Parents et Amis,

en témoignage d'affection.



O M M A I R E

	Page
NOTATIONS	I
RESUME	2
INTRODUCTION GENERALE	4
BASES THEORIQUES	6
A)THEORIE	7
B)PRINCIPE DE LA METHODE	II
C)APPLICATION A L'ETUDE DU LIBRE PARCOURS MOYEN	I4
D)DISCUSSION DES BASES THEORIQUES	I7
PARTIE EXPERIMENTALE	I8
A)DESCRIPTION DU POSTE D'ESSAI	I9
B)CRITIQUESDE L'INSTALLATION	2I
C)MODE OPERATOIRE	23
D)TABLEAUX DE MESURES ET CALCULS ANNEXES	25
INTERPRETATION DES RESULTATS	43
A)REPRESENTATION DU PECLLET EN FONCTION DU REYNOLDS	44
B)ETUDE DU COEFFICIENT DE DISPERSION	48
C)APPLICATION A L'ETUDE DU LIBRE PARCOURS MOYEN	50
CONCLUSION GENERALE	55
BIBLIOGRAPHIE	56
FIGURES	57



O T A T I O N S

C :	Concentration du traceur	(mole/l)
D :	Coefficient de diffusion moléculaire	(cm ² /s)
D _r :	" " dispersion radiale	(")
D _z :	" " " axiale	(")
D _t :	" " diffusion turbulente	(")
\bar{d} :	Diamètre moyen des particules	(cm)
d ₁ :	" des petites billes	(")
d ₂ :	" " grosses billes	(")
d _p :	" hydraulique de pore	(")
a :	Rayon du tube d'injection	(cm)
h :	Débit de traceur	(l/mn)
H ₁ :	" de fluide principal (rotamètre 1)	(")
H ₂ :	" " " " (rotamètre 2)	(")
k _{ij} :	Constante de la cellule (i-j)	(cm ⁻¹)
Y _{ij} :	Valeur lue sur le conductimètre (µaho)	(ohm ⁻¹)
K :	Conductance	(ohm ⁻¹ cm ⁻¹)
Per:	Critère de Peclet matériel	
Re _o :	" " Reynolds basé sur u _o	
Re :	" " " " " u	
Q _m :	Débit molaire de traceur	(mole/s)
r :	Rayon moyen entre deux électrodes	(cm)
S :	Pente de la droite obtenue en portant log C =f(r ²)	
T _o :	Facteur de tortuosité	
t _s :	Temps de séjour	(s)
u :	Vitesse axiale du fluide dans le gainage	(cm/s)
u _o :	" en fût vide	(")
X _m :	Distance quadratique moyenne	(cm)
X :	Composition du mélange	
Z :	Distance électrode-injecteur	(cm)
e :	Porosité du mélange	
∅ _m :	Flux de matière	(mole/cm ² s)
λ :	Libre parcours moyen	(cm)
ν :	Viscosité cinématique du fluide principal	(cm ² /s)

R E S U M E

L'objet de notre travail est l'étude de la dispersion radiale dans les colonnes noyées à travers des garnissages constitués par des mélanges binaires de sphères. La présente étude comprend trois parties principales que nous examinerons successivement ;

-Description de la méthode conductimétrique

-Interprétation des résultats et application au calcul du libre parcours moyen.

-Conclusions

I) DESCRIPTION DE LA METHODE CONDUCTIMETRIQUE

Le principe de cette méthode appliquée à l'étude de la dispersion radiale dans une colonne à garnissage, consiste à injecter un traceur salin dans le courant du fluide principal et à noter les modifications apportées à la conductivité de ce fluide par la distribution de ce traceur.

Le garnissage est constitué par un mélange binaire de sphères. Nous avons étudié plusieurs mélanges obtenus à partir de proportions différentes de deux catégories de billes :

-Billes de 1mm de diamètre

- " " 4 " " "

Dans la même perspective nous avons fait quelques essais avec des anneaux de Raschig de 6 mm de diamètre mais nous avons constaté que la présence d'une quantité importante d'air au sein de l'échantillon conduisait à des mesures erronées et le plus souvent non reproductibles dans le temps. Aussi avons nous estimé qu'une interprétation

quelconque de ces mesures n'aurait été que "dépourvue de bon sens".

II) INTERPRETATION DES RESULTATS, CALCUL DU LIBRE PARCOURS MOYEN :

Cette deuxième partie utilise les résultats précédents pour:

1°) l'étude de la validité d'une représentation $P_{er} = f(R_e^1)$ de la dispersion radiale dans un empilage binaire de sphères et cela dans un domaine de Reynolds bien déterminé.

2°) l'étude de la variation du libre parcours moyen du fluide en fonction de la composition du mélange.

III) CONCLUSIONS :

De ce travail nous avons tiré les conclusions suivantes:

1°) Il est absolument nécessaire de travailler avec un fluide principal exempt de gaz. La présence de celui-ci au sein du garnissage constitue le "point faible" de l'installation .

2°) Le coefficient de dispersion radiale passe par un maximum lorsque la composition du mélange est celle pour laquelle l'échantillon possède une porosité minimum.

3°) Quant à la valeur du libre parcours moyen d'un agrégat de fluide, il semble qu'elle soit particulièrement fixée par les grosses billes. Celles-ci jouent, en effet, un rôle bien plus important que celui des petites billes.

INTRODUCTION G E N E R A L E

L'écoulement gravifique d'un liquide dans les colonnes à garnissage a fait l'objet de nombreuses études aussi bien théoriques qu'expérimentales. De nombreux paramètres sur lesquels on a relativement peu de connaissances, conditionnent l'efficacité des procédés industriels faisant appel à ce type de colonnes (colonnes d'absorption, de distillation, réacteurs chimiques à lits fixes catalytiques). Parmi ces paramètres on peut citer:

- la texture du liquide sur le garnissage des colonnes
- la distribution du temps de séjour des éléments du liquide
- les phénomènes d'engorgement (dans le cas de l'écoulement à contre-courant gaz-liquide).

Un programme de recherches systématiques portant sur le plus grand nombre possible de paramètres dans les colonnes à garnissage, a été entrepris au laboratoire de Genie Chimique de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques.

Par un procédé d'absorption d'ammoniacue LESPINNASSE(I) a mis en évidence que l'écoulement du liquide ne peut s'interpréter par un mécanisme diffusionnel isotrope mais implique au contraire l'existence de chemins préférentiels qui ont certainement une influence sur le transfert de soluté.

Poursuivant ce travail PROST(2) a appliqué au garnissage irrigué une méthode électrique mise au point pour l'étude générale des milieux poreux. Elle consiste à comparer la conductance électrique spécifique et la porosité de milieux saturés de liquide conducteur à celles des modèles représentatifs de ces milieux.

Des travaux portant sur la dispersion radiale dans les colonnes avec divers garnissages de billes ont également été effectués par HARTMAN, WEVERS, KRALARS (3) d'une part et HIBY (4) d'autre part.

Dans la même perspective, une étude a été faite par LOURY (5) quant à la dispersion radiale au sein d'un garnissage constitué par des mélanges binaires de ^h sphères et ce en colonne noyée.

Il faut noter que sur le plan pratique, la dispersion présente l'intérêt de s'appliquer aux calculs de l'évacuation de la chaleur dans les réacteurs tubulaires. En effet l'analogie entre les différents transports d'extensité permet de traiter les problèmes de transports de chaleur en utilisant les résultats obtenus pour les transports de matière.

Parallèlement à ces différents travaux et particulièrement ceux portant sur les mesures de porosité, de conductivité électrique des garnissages, nous avons essayé d'étudier le phénomène de dispersion radiale en colonne noyée contenant des garnissages constitués d'une part, par des billes pures et d'autre part, par des mélanges de ces billes, de compositions différentes. Ceci nous rapproche des travaux de LOURY (5). Ce rapprochement est dû en fait, à la simplicité et à la rapidité de la méthode utilisée. En effet elle fait appel à un dispositif expérimental facilement accessible et de manipulation "aisée".

Cette étude a été menée sous les conseils de Messieurs Leclere et Cognet auxquels nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance.

B A S E S T H E O R I Q U E S

A) T H E O R I E

I) G E N E R A L I T E S

II) E X P R E S S I O N D E L A C O N C E N T R A T I O N C

B) P R I N C I P E D E L A M E T H O D E

I) T E C H N I Q U E O P E R A T O I R E

II) D E T E R M I N A T I O N D E L A P E N T E S

III) D E T E R M I N A T I O N D U P E C L E T M A T E R I E L

C) A P P L I C A T I O N A L ' E T U D E D U L I B R E P A R C O U R S M O Y E N

I) I N T E R P R E T A T I O N S T A T I S T I Q U E D E L A D I F F U S I O N

II) Q U E L Q U E S E X P R E S S I O N S

D) D I S C U S S I O N D E S B A S E S T H E O R I Q U E S

I) I N F L U E N C E D E L A D I S P E R S I O N A X I A L E

II) I N F L U E N C E D E S F R O N T I E R E S E T D E S P A R O I S

III) S I G N I F I C A T I O N D U R A Y O N R

IV) S I G N I F I C A T I O N D E S Y_{ij}

A) THEORIE

I) Généralités:

L'écoulement d'un fluide dans un garnissage provoque un intermélangeage habituellement étudié suivant les deux directions perpendiculaires: mélangeage axial et mélangeage radial. En ce qui nous concerne, nous nous proposons d'étudier le deuxième cas.

La description du processus de diffusion au sein d'un garnissage, suppose que le transfert global résulte d'un processus diffusif auquel s'ajoute un écoulement d'ensemble piston. Lorsque le nombre de Reynolds (Re) est assez grand, le transfert d'extensité par les agrégats tourbillonnaires se superpose au transfert moléculaire.

Un raisonnement analogue à celui établi lors de la diffusion moléculaire nécessite alors la définition d'un coefficient de diffusion turbulente que l'on désignera par D_t et la généralisation de la loi de FICK donne:

$$\text{Avec: } \left[\begin{array}{l} \phi_M = - (D + D_t) \frac{\partial C}{\partial r} = - D_r \frac{\partial C}{\partial r} \end{array} \right] \quad (I)$$

$$D_r = D + D_t$$

ϕ_M = le flux molaire transféré

D = coefficient de diffusion moléculaire

D_t = " " " " turbulente

$\frac{\partial C}{\partial r}$ = gradient de concentration (radial)

Si D est une constante, D_t , autrement dit D_r , dépendra des conditions de l'écoulement et de la position du point considéré

Pour mettre en évidence la contribution de la turbulence au transfert de matière, on introduit un nombre adimensionnel désigné par le critère de Peclet Matériel Pe_r . Celui-ci caractérise l'importance relative des transports turbulent et diffusionnel exprimée par le rapport:

$$\frac{\text{Transport d'ensemble, turbulent}}{\text{Transport diffusionnel seul}}$$

Le critère de Peclet est alors défini par :

$$Pe_r = \frac{u \bar{d}}{D_r} \quad \text{où} \quad \left\{ \begin{array}{l} u = \text{vitesse linéaire du fluide} \\ \text{principal dans le garnissage} \\ \bar{d} = \text{diamètre moyen des particules} \end{array} \right.$$

Remarques :

- Si le Pe_r est élevé, cela signifie que les transports transversaux de matière sont peu importants vis à vis du transport longitudinal par l'écoulement d'ensemble.

- La littérature anglo-saxonne réserve au critère de Peclet matériel la désignation " nombre de Bodenstein" .

II) HYPOTHESES

Selon les hypothèses faites sur les conditions d'écoulement, on arrive à différentes équations (résumées dans le "Levenspiel"). En ce qui nous concerne nous supposons la diffusion à partir d'un point source et en l'absence de limites quant à la distance de dispersion (c'est à dire selon le rayon de la colonne). Nous supposons également la vitesse uniforme dans une section droite de la colonne et un régime stationnaire entièrement établi. Nous nous contenterons d'étudier le phénomène de mélangeage radial seul .

III) EXPRESSION DE LA CONCENTRATION C

Dans les conditions précédentes nous obtenons pour un point quelconque de la colonne M (r,z,t) une équation de la forme :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\text{grad}} C = D_r \Delta C \quad (2)$$

Avec: $\Delta C = \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u \end{bmatrix} \text{ en } \begin{bmatrix} r \\ r \\ z \end{bmatrix}$$

$$\vec{\text{grad}} C = \frac{\partial C}{\partial z}, 0, \frac{\partial C}{\partial r}$$

Selon les hypothèses précédentes

- régime stationnaire : $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$
- dispersion radiale seule : $D_r \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$ est négligeable devant

$$t = \frac{Z}{u} \quad (\text{ici } t \text{ est le temps de séjour}) \quad \left| \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right.$$

nous obtenons en conséquence: $\frac{\partial C}{\partial t} = D_r \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (3)$

Dans ce cas la solution de (3) est:

$$C = K \exp \left(- \frac{r^2}{4 D_r t} \right)$$

soit

$$C = \frac{Q_m}{4 \pi D_r Z} \exp \left(- \frac{u r^2}{4 D_r Z} \right) \quad (4)$$

(voir "Levenspiel" et "Bird ")

- Avec:
- Q_m : débit molaire du traceur = $C_0 \pi u a^2$
 - a : rayon du tube d'injection du traceur
 - C_0 : concentration initiale du traceur

Soit :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{u a^2}{4 D_r Z} \exp\left(-\frac{u r^2}{4 D_r Z}\right) \quad (5)$$

nous avons en prenant le logarithme décimal de (5)

$$\log \frac{C}{C_0} = \log \frac{u a^2}{4 D_r Z} - \frac{u r^2}{9,212 D_r Z} \quad (6)$$

Nous remarquons alors que la représentation $\log \frac{C}{C_0} = f(r^2)$ donne une droite de pente (au signe près)

$$\boxed{S = \frac{u}{9,212 D_r Z}} \quad (7)$$

Nous allons voir maintenant comment le montage proposé permet d'atteindre toutes ces grandeurs (voir principe de la méthode).

B) PRINCIPE DE LA METHODE

I) TECHNIQUE

L'étude de la dispersion radiale utilise la technique des traceurs. La méthode consiste à placer des électrodes ne perturbant pas les phénomènes hydrodynamiques dans la colonne. On injecte dans l'écoulement principal un fluide secondaire ne perturbant pas ce dernier et contenant une solution détectable dont on suit la répartition à une distance fixe de l'injecteur. Cette distribution est rendue possible par mesure de la conductance électrique apparente du garnissage irrigué, la phase liquide étant seule conductrice.

Nous rappelons que dans cette étude, le modèle théorique de distribution du traceur dans le fluide s'écoulant dans le garnissage, est basé sur une hypothèse d'écoulement diffusionnel.

II) DETERMINATION DE LA PENTE S

Pour la détermination de la pente S nous avons assimilé la concentration C du traceur à sa conductance électrique spécifique K. Dans une telle hypothèse les mesures de concentration se ramènent à celles de conductances électriques. Nous appellerons:

- $K_{ij} = k_{ij} \cdot Y_{ij}$ la conductance électrique mesurée entre les électrodes i et j qui constituent la cellule (i-j).
- k_{ij} = constante de la cellule (i-j).
- Y_{ij} = la valeur lue sur le conductimètre pour la cellule (i-j).
- Y'_{ij} = la valeur lue sur le conductimètre pour la cellule (i-j) par passage de la solution saline.

Notons que:

- (K) = (Ohm^{-I} cm^{-I})
- (k) = (cm^{-I})
- (Y) = (Ohm^{-I})

La détermination des constantes k_{ij} a été faite, avant chaque mesure, par circulation d'une solution saline en circuit fermé. De ce fait nous avons une même concentration, c'est à dire une même conductance dans toute la section de la colonne. De plus nous avons ^{fait} en sorte que l'on ait :

$$I = k_{ij} \cdot Y'_{ij} = k_{i+I, j+I} \cdot Y'_{i+I, j+I} = \dots \dots \dots \quad (9)$$

Or pour une mesure quelconque nous avons:

$$C_{ij} = K_{ij} = k_{ij} \cdot Y_{ij} \quad (10)$$

Nous remarquons que le rapport $\frac{(10)}{(9)}$ donne pour la cellule (ij) par exemple :

$$\frac{k_{ij} \cdot Y_{ij}}{k_{ij} \cdot Y'_{ij}} = \frac{Y_{ij}}{Y'_{ij}} = C_{ij}$$

Soit:

$$C_{ij} = K_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y'_{ij}} \quad (11)$$

Ceci transforme l'équation (6) en :

$$\log \frac{Y_{ij}}{Y'_{ij}} = \log \frac{u r^2}{4 D_r Z} - S r^2 \quad (12)$$

Donc en portant $\log \frac{Y_{ij}}{Y'_{ij}} = f(r^2)$ nous obtenons toujours une droite de pente S . Nous signalons que le principe de la méthode repose essentiellement sur les mesures des Y_{ij} . Or le montage proposé nous permet d'obtenir facilement ces grandeurs. En effet:

- le rayon r est facilement mesurable (d'où r^2)
- la distance Z est fixée
- le diamètre moyen des billes \bar{d} est calculé simplement par:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^2 \frac{X_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^2 \frac{X_i}{d_i^3}}$$

où: X_i = composition volumique du garnissage en billes de catégorie (i)

III) DETERMINATION DU PECLET MATERIEL Pe_r

D'après sa définition même nous avons $Pe_r = \frac{u \bar{d}}{D_r}$ nous remarquons qu'il est possible de l'obtenir en utilisant la relation (7). En effet le produit $S \cdot Z \cdot \bar{d}$ donne à un facteur près le Pe_r .

$$S \cdot Z \cdot \bar{d} = \frac{u}{9,212 D_r Z} \cdot Z \bar{d} = \frac{u \bar{d}}{9,212 D_r} = \frac{Pe_r}{9,212}$$

Soit $Pe_r = \frac{u \bar{d}}{D_r} = 9,212 S Z \bar{d}$ (8)

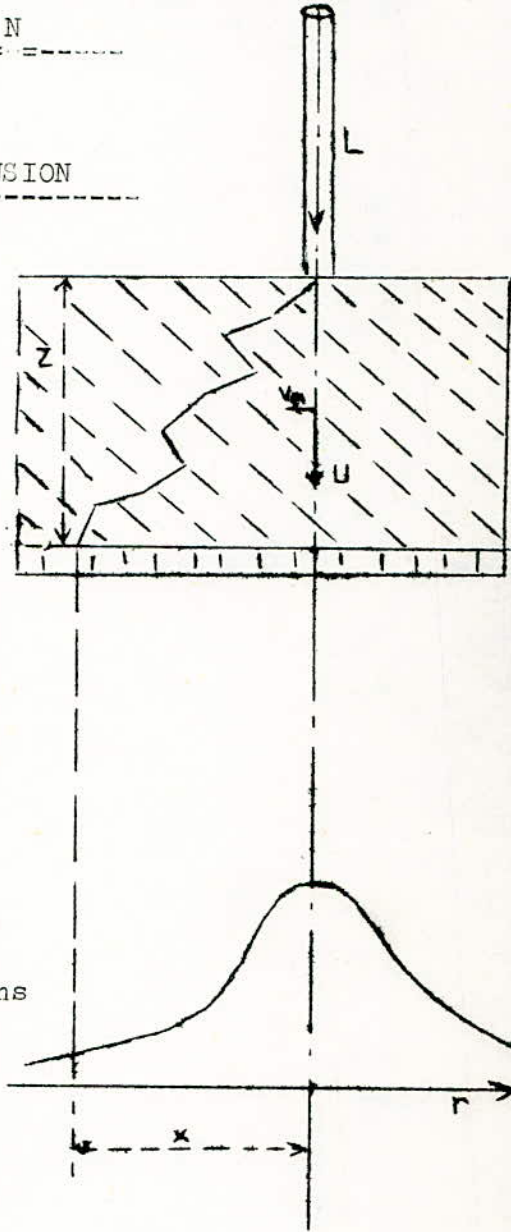
Où Z est la distance séparant l'injecteur de l'électrode.

Donc la connaissance des paramètres S, Z, \bar{d} permet d'obtenir le Pe_r qui donne à son tour le coefficient de dispersion radiale D_r . C'est surtout la simplicité de la méthode utilisée, basée sur l'obtention aisée des différents facteurs, qui a motivé son choix. Nous signalerons que c'est ce caractère "simpliste" qui fait tout l'intérêt de la méthode.

C) APPLICATION A L'ETUDE DU LIBRE
 PARCOURS MOYEN

1) INTERPRETATION STATISTIQUE DE LA DIFFUSION

Considérons un garnissage de largeur infinie et de hauteur Z, arrosé de liquide en son point. Nous supposons que le filet liquide coule dans le garnissage en suivant une trajectoire aléatoire composée d'un enchaînement de parcours rectilignes. Nous projetons cette trajectoire sur un axe vertical et un axe horizontal et nous nous occupons plus particulièrement de la composante horizontale.



Après n parcours élémentaires, le filet liquide a parcouru une trajectoire totale dans le sens horizontal, \vec{L}_n telle que:

$$\vec{L}_n = \sum_{i=1}^n \vec{x}_i$$

Nous supposons d'autre part que les sens et modules des parcours \vec{x}_i sont distribués au hasard c'est à dire en l'absence d'écoulement préférentiel. Nous définissons alors la moyenne quadratique des parcours élémentaires par:

$$\lambda^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$$

Durant les n parcours élémentaires, la distance quadratique moyen-

ne x_m d'un filet à son point de départ est telle que:

$$x_m = \lambda \sqrt{\frac{n+1}{2}}$$

Soit:

- u : la composante verticale ^{moyenne} de la vitesse d'écoulement, le temps de séjour t_s moyen des filets dans le garnissage est donné par:

$$t_s = \frac{Z}{u} \quad (1')$$

- v_m : la composante horizontale quadratique moyenne de cette vitesse d'écoulement, le coefficient de tortuosité T_0 des filets est exprimé par le rapport:

$$T_0 = \frac{v_m}{u}$$

la durée moyenne t_0 d'un parcours élémentaire est:

$$t_0 = \frac{\lambda}{v_m}$$

le temps de séjour du filet dans le garnissage est (pour $n \gg 1$)

$$t_s = n t_0 = n \frac{\lambda}{v_m} = (n+1) \frac{\lambda}{v_m}$$

soit:

$$t_s = \frac{2 x_m^2}{\lambda v_m} \quad (2')$$

en rapprochant (1') et (2'), il vient :

$$2 x_m^2 = \frac{v_m}{u} Z \lambda$$

Nous pouvons supposer alors que le parcours moyen élémentaire doit être de l'ordre de grandeur du diamètre d'un corps de garnissage, soit d_g (le diamètre d'un grain). Nous poserons ; $\lambda = b d_g$ ($b \approx 1$)

Il vient:

$$2 x_m^2 = T_0 b Z d_g \quad (3')$$

Remarque

T_0 et b sont de l'ordre de grandeur de l'unité

En assimilant le garnissage poreux à un milieu continu où les

filets sont équivalents à un mouvement diffusionnel isotrope, le coefficient de diffusion sera donné par la relation:

$$D = \frac{x_m^2}{2 t_s} = \frac{v_m}{4} \quad (4')$$

en combinant les relations (3') et (4') nous tirons:

$$T_o b = \frac{4}{P_e} \quad (5')$$

II) QUELQUES RELATIONS

Pour vérifier si la relation précédente (5') donne à la quantité T_o , une valeur voisine de l'unité, nous ferons appel à des grandeurs caractéristiques utilisées en Mécanique des Milieux poreux et dispersés (cours de Genie Chimique P. LEGOFF). En effet l'hypothèse du modèle de KOZENY conduit aux paramètres suivants:

-la surface spécifique du grain a_g : $a_g = \frac{6}{\bar{d}}$
 -le diamètre hydraulique de pore d_p : $d_p = \frac{4 e}{(1 - e) a_g}$

Soit: $\bar{d} = \frac{3}{2} \frac{(1 - e)}{e} d_p$

Comme nous avons supposé $\lambda = d_p$ et puisque $\lambda = b \bar{d}$; il en résulte :

$$\frac{3 b (1 - e)}{2 e} = 1 \quad \text{d'où} \quad b = \frac{2 e}{3 (1 - e)}$$

et l'on obtient finalement:

$$T_o = 6 \frac{(1 - e)}{e} \frac{1}{P_e}$$

D) DISCUSSIONS DES BASES THEORIQUES

I) INFLUENCE DE LA DISPERSION AXIALE

En toute vérité, au gradient de concentration dans la direction radiale correspond un gradient de concentration dans la direction de l'axe (voir équation 2). Cependant des études faites par HIBY(4), montrent que dans la zone du nombre de Reynolds où nous nous trouvons, le rétro-mélangeage est très faible. Ceci justifie donc l'hypothèse de calcul faite au départ.

II) INFLUENCE DES FRONTIERES ET DES PAROIS

Egalement des études faites par SINCLAIR et POTTER(6) ont montré que tant que le rapport des concentrations au centre et à la paroi de la colonne, reste inférieur à 10, l'erreur sur la pente de la droite $\log C = f(r^2)$, est de l'ordre de grandeur de 1%. L'ensemble de nos mesures a donné des rapports compris dans cette zone.

III) SIGNIFICATION DE r :

Dans les équations précédemment établies, la concentration C correspond au rayon r . Or nous mesurons la conductivité entre les électrodes de rayon r_i et r_{i+1} . Nous avons supposé alors:

$$r = \frac{1}{2}(r_i + r_{i+1})$$

IV) SIGNIFICATION DES Y_{ij} :

Les valeurs des Y_{ij} portées dans les tableaux de mesures sont des valeurs corrigées, c'est à dire tiennent compte de la conductivité propre de l'eau de ville .

P A R T I E E X P E R I M E N T A L E

A)DESCRIPTION DU POSTE D'ESSAI

I)SCHEMA GENERAL

II)L'ALIMENTATION

III)LA COLONNE

IV)L'ELECTRODE

V)L'INJECTION

VI)LE GARNISSAGE

VII)REMARQUES

B)CRITIQUES DE L'INSTALLATION

I)L'ALIMENTATION

II)L'ELECTRODE

III)LE GARNISSAGE

C)MODE OPERATOIRE

I)METHODE EXPERIMENTALE

II)QUELQUES CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

III)REMARQUES

A) DESCRIPTION DU POSTE D'ESSAI

I) SCHEMA GENERAL:

Il est représenté par la figure (I). Nous en examinons successivement les différentes parties.

II) L'ALIMENTATION :

La conductibilité de l'eau de ville est trop importante pour pouvoir la négliger. Nous avons voulu la traiter préalablement au moyen d'un échangeur d'ions mais ce dernier s'est révélé défectueux. Aussi avons nous été obligés, avant chaque mesure de conductibilité, une fois le traceur introduit dans l'écoulement principal, de tenir compte de la conductibilité propre de l'eau de ville. Celle-ci est notée avant chaque série de mesures.

Pour essayer de dégazer l'eau du robinet, nous la faisons arriver dans un bac. Du bac une pompe l'achemine en tête de colonne. Les débits d'alimentation sont par deux rotamètres de type METRIC (IO S et I4), placés en série.

III) LA COLONNE:

Pour la forme et les dimensions on se reportera sur la figure (I). Nous rappelons toutefois que de façon à assurer une répartition homogène de l'écoulement, l'eau arrive au sommet de la colonne et tombe sur une grille.

IV) L'ELECTRODE :

Elle est constituée de cinq circonférences métalliques (en fil de cuivre), portées par un joint raccordant deux éléments de la colonne. Elles forment ainsi quatre cellules de mesures entre lesquelles on

peut mesurer les conductivités Y_{ij} par commutation sur un conductimètre du type " Electronic Switchgear " M C I / Mark IV .

V) L'INJECTION:

Le traceur est une solution de NaCl à 15%, injectée à l'aide d'un tube de 1 mm de diamètre. Le débit de traceur est contrôlable par un rotamètre du type ROTA L 16 / 630-II93 . La variation éventuelle de la distance injection-électrode est obtenue par le déplacement du tube, repéré par un index, le long d'une règle graduée.

VI) LE GARNISSAGE

Il est constitué par deux types de billes:

- a) billes de 1 mm de diamètre (densité : $2,82 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
- b) " " 4 " " " (" : $2,80$ ")

Nous en avons également étudié différents mélanges. Ceux-ci étant réalisés par introduction simultanée des deux types de billes au moyen de deux entonnoirs placés en tête de colonne . Cela donne approximativement un mélange homogène selon les directions radiale et axiale de l'échantillon de garnissage considéré.

VII) REMARQUES

- L'utilisation des petites billes (0,4 cm de diamètre) n'a pas été possible du fait que nous ne pouvions obtenir la même gamme de débits qu'avec les autres mélanges.

- Signalons d'autre part qu'il nous a été impossible de réaliser des mélanges en faible teneur en petites billes et pouvant être considérés comme homogènes.

B) CRITIQUES DE L'INSTALLATION

I) L'ALIMENTATION:

La conductimétrie est une bonne méthode d'étude du phénomène de dispersion mais elle suppose que le fluide sur lequel on opère est entièrement dégazé. Or la présence de bulles d'air au sein du garnissage constitue le point faible de cette installation. En effet la présence de ces bulles d'air faussent certainement les mesures de conductibilité, augmentent la porosité du mélange en se fixant sur les billes de l'échantillon de garnissage et surtout augmentent considérablement la résistance.

Il aurait fallu travailler en circuit fermé et sur de l'eau entièrement dégazée pour prétendre à de bons résultats. Dans de telles conditions, le traceur dont l'eau est chargée à la sortie de la colonne, pouvant être éliminé par un échangeur d'ions.

Au cours de nos mesures, nous avons constaté, "à notre grand déplaisir" la présence de bulles d'air au sein du garnissage en quantité plus ou moins importante. Les résultats en sont certainement affectés. Quant à travailler en circuit fermé, il n'en était pas question en raison de la défektivité de l'échangeur d'ions dont nous disposions.

II) L'ELECTRODE:

Dans sa forme actuelle elle peut convenir mais nous estimons le nombre de cellules insuffisant. Comme les variations de concentration sont plus importantes au centre de la colonne qu'au voisinage de la paroi (cf: une courbe en cloche) il est préférable d'augmenter le nombre de cellules au centre de la colonne sans toutefois trop les rapprocher pour que le conductimètre indique des variations notables

Cependant nous avons été limités par les dimensions de la colonne (le diamètre n'excède pas 50 mm). Ceci montre que l'utilisation d'une colonne de dimension plus importante ne ferait qu'améliorer la précision des mesures.

III) LE GARNISSAGE:

Nous remarquerons tout d'abord qu'il n'y a pas une parfaite homogénéité quant à la répartition des billes formant l'échantillon de garnissage. Mais dans l'ensemble nous l'avons estimée satisfaisante. Avant introduction dans la colonne les billes doivent être bien propres et sèches pour éviter toute formation "d'agrégats" .

C) M O D E O P E R A T O I R E

I) TECHNIQUE EXPERIMENTALE;

Les opérations à effectuer sont dans l'ordre suivant:

1°) Réalisation de l'empilement, calcul de la composition et de la porosité.

2°) Rinçage de la colonne

3°) Détermination relative des constantes des électrodes en faisant circuler une solution saline.

4°) Etablissement du régime d'écoulement et injection du traceur. On doit s'assurer que la vitesse linéaire du traceur est sensiblement égale à celle du fluide principal.

Ainsi pour chaque distance injecteur-electrode nous procédons toujours de la manière suivante:

-Noyade de la colonne

-Réglage du débit

-Etablissement de l'écoulement

-Injection du traceur

-Etablissement du régime permanent et mesures.

De plus pour chaque série de mesures nous relevons:

-la composition du mélange : X

-la porosité du mélange : e

-la conductivité de la solution saline : Y'_{ij}

-la " de l'eau propre

-la " du traceur seul : Y_{ij}

-le débit de l'alimentation principale: H_1 (ou H_2)

-le débit de sel : h

Les calculs se font de la façon suivante :

a) la composition X

$$X = \frac{V_I}{V_I + V_2}$$

où V_I = volume réel occupé par
les billes de diamètre d_I
 V_2 = volume réel occupé par
les billes de diamètre d_2

b) la porosité: e

$$e = 1 - \frac{V_I + V_2}{V_t}$$

où V_t = volume total de l'élément de colonne recevant le
mélange

II) QUELQUES CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

Electrodes(ij)---	I - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5
rayon moyen (cm)	2	1,56	1,08	0,7
r ²	4	2,43	1,17	0,49

III) REMARQUES

a) Entre chaque série de mesures il est préférable de débarrasser les électrodes du dépôt de sel qui s'y serait fait.

b) Nous avons noté au cours des mesures qu'il était nécessaire que le débit d'alimentation de l'écoulement principal soit égal au débit d'évacuation (à la sortie de la colonne en tenant compte du débit de traceur. Ceci permet en effet d'éviter toute "concentration" de sel au niveau des électrodes. Pour cela nous réglions les débits de manière à maintenir une hauteur de colonne n^ovée constante.




A B L E A U X D E



E S U R E S

E T



A L C U L S



N N E X E S

-----oo-----

NOTE

Les tableaux que nous donnons rassemblent les mesures effectuées et les calculs annexes pour différents débits, pour diverses distances injecteur-électrode ($Z = 10, 20, 30, 40$ cm) et pour différentes compositions du garnissage .

Cependant pour les discussions des résultats nous n'utiliserons que les mesures relatives à la distance $Z = 30$ cm . En effet nous avons remarqué, au cours des manipulations, que pour cette distance les "fluctuations" des mesures expérimentales étaient relativement faibles devant celles observées pour les autres mesures . Nous signalons que les autres distances donnent le même type de résultats .

Nous donnons également un exemple de calcul d'erreur appliqué au P_{er} et au D_r , que l'on pourra trouver en annexe .

	Z = 20 cm	e = 0,279	$\bar{d} = 0,115$ cm	$9,212 \bar{dZ} = 21,2$	x = 0,202				
h = 10	Electrodes (i.j) →	1-2	2-3	3-4	4-5	S	ud	Pe	Dr.
$H_1 = 5$	$Y'_{ij} \times 10^4$	0,27	0,2	0,14	0,0375				
$Q_0 = 0,48$ l/mm	$Y_{ij} \times 10^4$	4,93	4,75	4,26	2,56				
$U_0 = 0,405$ cm/s	Y_{ij} / Y'_{ij}	18,2	23,7	30,5	68,5	0,08	0,167	1,69	10,098
$U = 1,45$ cm/s $Re_0 = 4,67$ $Re' = 3,88$	$\log Y_{ij} / Y'_{ij}$	1,26	1,375	1,484	1,835				
$H_1 = 10$	$Y'_{ij} \times 10^4$	0,27	0,2	0,14	0,0375				
$Q_0 = 0,8$ l/mm $U_0 = 0,676$ cm/s	$Y_{ij} \times 10^4$	4,33	4,21	3,765	2,26				
$U = 2,42$ cm/s $Re_0 = 7,75$ $Re' = 6,45$	Y_{ij} / Y'_{ij}	16	22,1	27,9	64	0,085	0,279	1,795	10,155
	$\log Y_{ij} / Y'_{ij}$	1,204	1,345	1,445	1,805				
$H_1 = 15$	$Y'_{ij} \times 10^4$	0,27	0,2	0,14	0,0375				
$Q_0 = 1,131$ l/mm $U_0 = 0,96$ cm/s	$Y_{ij} \times 10^4$	3,73	3,505	3,21	1,807				
$U = 3,44$ cm/s $Re_0 = II, I$ $Re' = 9,2$	$Y_{ij} \times Y'_{ij}$	13,8	17,95	22,9	42,5	0,095	0,396	2,01	0,197
	$\log Y_{ij} / Y'_{ij}$	1,14	1,26	1,36	1,628				
$H_1 = 20$	$Y'_{ij} \times 10^4$	0,27	0,2	0,14	0,0375				
$Q_0 = 1,51$ l/mm $U_0 = 1,27$ cm/s	$Y_{ij} \times 10^4$	3,32	3,21	2,96	1,71				
$U = 4,55$ cm/s $Re_0 = I4,6$ $Re' = I2,2$	Y_{ij} / Y'_{ij}	11,85	16,9	22	42,7	0,105	0,524	2,11	0,248
	$\log Y_{ij} / Y'_{ij}$	1,075	1,228	1,34	1,63				
$H_1 = 25$	$Y'_{ij} \times 10^4$	0,27	0,2	0,14	0,0375				
$Q_0 = 1,9$ l/mm $U_0 = 1,01$ cm/s	$Y_{ij} \times 10^4$	3,13	2,905	2,665	1,59				
$U = 5,77$ $Re_0 = I8,5$ $Re' = I5,4$	Y_{ij} / Y'_{ij}	11,6	14,9	19,7	39	0,09	0,663	1,9	0,349
	$\log Y_{ij} / Y'_{ij}$	1,064	1,17	1,29	1,59				

	Z = 30 cm	e = 0,279	$\bar{a} = 0,115$	$9,212 \bar{a}Z = 31,8$	x = 0,202				
h = 10	Electrodes (i,j) →	1-2	2-3	3-4	4-5	S	ud	Pe	Dr.
H ₁ = 5	Y ^{'ij} x 10 ⁴	10,27	0,2	0,14	0,0375				
Q ₀ = 0,481/mm U ₀ = 0,405 cm/s	Y _{ij} x 10 ⁴	16,48	5,8	4,46	2,52	0,045	0,167	1,43	0,117
U = 1,45 cm/s	Y _{ij} /Y ^{'ij}	24	29	31,9	67				
Re ₀ = 4,67 Re _i = 3,88	log Y _{ij} /Y ^{'ij}	1,38	1,462	1,504	1,828				
H ₁ = 10	Y ^{'ij} x 10 ⁴	0,27	0,2	0,14	0,0375				
Q ₀ = 0,80 l/mm U ₀ = 0,676 cm/s	Y _{ij} x 10 ⁴	5,53	4,81	3,87	2,06	0,06	0,279	1,91	0,146
U = 2,42 cm/s	Y _{ij} /Y ^{'ij}	20,5	25,3	28,6	51,5				
Re ₀ = 7,75 Re _i = 6,45	log Y _{ij} /Y ^{'ij}	1,31	1,4	1,456	1,71				
H ₁ = 15	Y ^{'ij} x 10 ⁴	0,27	0,2	0,14	0,0375				
Q ₀ = 1,13 l/mm U ₀ = 0,96 cm/s	Y _{ij} x 10 ⁴	4,93	4,205	3,51	1,807				
U = 3,44 cm/s	Y _{ij} /Y ^{'ij}	18,3	21,6	25,1	42,6	0,055	0,396	1,75	0,226
Re ₀ = 11,1 Re _i = 9,2	log Y _{ij} /Y ^{'ij}	1,26	1,335	1,398	1,63				
H ₁ = 20	Y ^{'ij} x 10 ⁴	0,27	0,2	0,14	0,0375				
Q ₀ = 1,51 l/mm U ₀ = 1,27 cm/s	Y _{ij} x 10 ⁴	4,12	3,51	2,915	1,61				
U = 4,55 cm/s	Y _{ij} /Y ^{'ij}	14,7	18,5	21,6	40,2	0,06	0,524	1,91	0,274
Re ₀ = 14,6 Re _i = 12,2	log Y _{ij} /Y ^{'ij}	1,17	1,265	1,334	1,6				
H ₁ = 25	Y ^{'ij} x 10 ⁴	0,27	0,2	0,14	0,0375				
Q ₀ = 1,9 l/mm U ₀ = 1,61 cm/s	Y _{ij} x 10 ⁴	3,53	2,95	2,665	1,43				
U = 5,77 cm/s	Y _{ij} /Y ^{'ij}	13,1	14,9	19,7	35,7	0,075	0,663	2,39	0,277
Re ₀ = 18,5 Re _i = 15,4	log Y _{ij} /Y ^{'ij}	1,11	1,172	1,294	1,55				

		Z = 30 cm	e = 0,3	$\bar{d} = 0,105 \text{ cm}$	$9,212 d Z = 29,01$	$x = 0,49$				
h = 10		Electrodes (i.j) →	1-2	2-3	3-4	4-5	S	ud	Pe	Dr.
H ₁ = 5	Y'ij x 10 ⁴	0,48	0,36	0,28	0,15					
Q ₀ = 0,48 l/mn	Yij x 10 ⁴	3,62	4,34	4,52	2,80					
U ₀ = 0,405 cm/s	Yij/Y'ij	7,55	12,05	16,1	18,65	0,1	0,142	2,901	0,049	
U = 1,35 cm/s	log Yij/Y'ij	0,878	1,082	1,208	1,27					
Re ₀ = 4,25	Y'ij x 10 ⁴	0,48	0,36	0,28	0,15					
Re = 3,38	Yij x 10 ⁴	2,91	3,62	3,99	2,69	0,13	0,237	13,77	0,0627	
H ₁ = 10	Yij/Y'ij	5,94	9,53	12,85	16,8					
Q ₀ = 0,8 l/mn	log Yij/Y'ij	0,773	0,98	1,11	1,225					
U ₀ = 0,676 cm/s	Y'ij x 10 ⁴	0,48	0,36	0,28	0,15					
U = 2,25 cm/s	Yij x 10 ⁴	2,56	3,19	3,455	2,345	0,14	0,335	4,06	0,083	
Re ₀ = 7,08	Yij/Y'ij	5,22	8,87	11,7	15,1					
Re = 5,62	log Yij/Y'ij	0,718	0,946	1,07	1,18					
H ₁ = 15	Y'ij x 10 ⁴	0,48	0,36	0,28	0,15					
Q ₀ = 1,131 l/mn	Yij x 10 ⁴	2,28	2,96	3,215	2,095	0,14	0,445	4,06	0,109	
U ₀ = 0,96 cm/s	Yij/Y'ij	4,85	8,72	11,25	13,5					
U = 3,2 cm/s	log Yij/Y'ij	0,685	0,94	1,05	1,13					
Re ₀ = 10,1	Y'ij x 10 ⁴	0,48	0,36	0,28	0,15					
Re = 8,03	Yij x 10 ⁴	2,08	2,25	2,92	1,90	0,14	0,564	4,06	0,139	
H ₁ = 20	Yij/Y'ij	4,43	8,07	10,43	12,6					
Q ₀ = 1,57 l/mn	log Yij/Y'ij	0,645	0,906	1,02	1,1					
U ₀ = 1,27 cm/s	Y'ij x 10 ⁴	0,48	0,36	0,28	0,15					
U = 4,23 cm/s	Yij x 10 ⁴	2,08	2,25	2,92	1,90	0,14	0,564	4,06	0,139	
Re ₀ = 13,35	Yij/Y'ij	4,43	8,07	10,43	12,6					
Re = 13,44	log Yij/Y'ij	0,645	0,906	1,02	1,1					
H ₁ = 25	Y'ij x 10 ⁴	0,48	0,36	0,28	0,15					
Q ₀ = 1,91 l/mn	Yij x 10 ⁴	2,08	2,25	2,92	1,90	0,14	0,564	4,06	0,139	
U ₀ = 1,61 cm/s	Yij/Y'ij	4,43	8,07	10,43	12,6					
U = 5,37 cm/s	log Yij/Y'ij	0,645	0,906	1,02	1,1					
Re ₀ = 16,9	Y'ij x 10 ⁴	0,48	0,36	0,28	0,15					
Re = 13,44	Yij x 10 ⁴	2,08	2,25	2,92	1,90	0,14	0,564	4,06	0,139	
	Yij/Y'ij	4,43	8,07	10,43	12,6					
	log Yij/Y'ij	0,645	0,906	1,02	1,1					

		Z = 10 cm	e = 0,305	d̄ = 0,102 cm	9,212 dZ =	x = 0,580			
						9,4			
H ₁ = 10	Electrodes (i,j) →	1-2	2-3	3-4	4-5	S	ud	Pe	Dr.
H ₁ = 5	Y' _{ij} x 10 ⁴	0,17	0,115	0,075	0,015				
Q ₀ = 0,48 l/mm U ₀ = 0,405 cm/s	Y _{ij} x 10 ⁴	0,70	1,65	3	1,26	0,365	0,136	3,43	0,0397
U = 1,33 cm/s Re ₀ = 4,15 Re = 3,26	Y _{ij} /Y' _{ij}	4,12	14,35	40	84				
	log Y _{ij} /Y' _{ij}	0,615	1,158	1,6	1,924				
H ₁ = 10	Y' _{ij} x 10 ⁴	0,17	0,115	0,075	0,015				
Q ₀ = 0,80 l/mm U ₀ = 0,676 cm/s	Y _{ij} x 10 ⁴	0,51	1,05	2,4	1,11	0,41	0,226	3,85	0,0587
U = 2,21 cm/s Re ₀ = 6,87 Re = 5,4	Y _{ij} /Y' _{ij}	3	9,14	32	74				
	log Y _{ij} /Y' _{ij}	0,478	0,964	1,504	1,868				
H ₁ = 15	Y' _{ij} x 10 ⁴	0,17	0,115	0,075	0,015				
Q ₀ = 1,13 l/mm U ₀ = 0,96 cm/s	Y _{ij} x 10 ⁴	0,45	0,9	1,95	0,98	0,43	0,322	4,04	0,08
U = 3,15 cm/s Re ₀ = 9,8 Re = 7,7	Y _{ij} /Y' _{ij}	2,65	7,83	26	65,2				
	log Y _{ij} /Y' _{ij}	0,42	0,894	1,414	1,814				
H ₁ = 20	Y' _{ij} x 10 ⁴	0,17	0,115	0,075	0,015				
Q ₀ = 1,51 l/mm U ₀ = 1,27 cm/s	Y _{ij} x 10 ⁴	0,39	0,74	1,7	0,74	0,46	0,425	4,32	0,0985
U = 4,17 cm/s Re ₀ = 12,9 Re = 10,1	Y _{ij} /Y' _{ij}	2,28	6,44	22,7	49,2				
	log Y _{ij} /Y' _{ij}	0,36	0,81	1,365	1,69				

INTERPRETATION DES RESULTATS

A) REPRESENTATION DU PECLET EN FONCTION DU REYNOLDS

I) COURBES :

1°) $P_e = f(X)$

2°) $\frac{u}{D_r} = f(X)$

3°) $P_e = f(Re_0)$

4°) Conclusions

II) COMPARAISON AVEC LA LITTERATURE

B) ETUDE DU COEFFICIENT DE DISPERSION RADIALE

I) COURBES :

II) COMMENTAIRES DES COURBES

1°) $D_r = f(X)$

2°) $D_r = f(u)$

3°) $D_r = f(Re_0)$

C) APPLICATION A L'ETUDE DU LIBRE PARCOURS MOYEN

I) RAPPELS

II) PREMIERE HYPOTHESE

1°) Analyse des résultats

2°) Conclusions

III) DEUXIEME HYPOTHESE

1°) Analyse des résultats

2°) Conclusions

A) REPRESENTATION DU PECLLET EN FONCTION DU REYNOLDS

I) COURBES

Nous avons donné sur la figure(2) le réseau des courbes $Pe=f(X)$ pour les différents mélanges, correspondant à un seul débit. En effet pour être plus clair nous n'avons représenté que les courbes relatives à $H_I=20$ (1,51 litre/mn). Les autres débits donnent le même type de courbes. Nous avons également représenté les courbes suivantes:

$$\frac{u}{D_r} = f(X) \text{ sur la figure (3)}$$

$$Pe = f(Re_0) \text{ " " " (4)}$$

II) COMMENTAIRES DES COURBES

1°) $Pe = f(X)$: fig (2)

Nous constatons que la courbe $Pe = f(X)$ présente un minimum pour une composition du mélange $X=0,25$. Nous constatons également que le Peclet chute **rapidement** dès que l'on ajoute une petite quantité de petites billes. Ceci nous paraît normal puisqu'en même temps le diamètre moyen \bar{d} subit la même chute (voir courbe $\bar{d}=f(X)$ en annexe).

2°) $\frac{u}{D_r} = f(X)$: fig (3)

Celle-ci présente également un minimum pour $X=0,25$. Or nous remarquons qu'à cette valeur de X correspond précisément le minimum de la porosité e du mélange. Cette analogie avec la courbe $Pe=f(X)$ est évidente puisque nous avons $Pe = \frac{u \bar{d}}{D_r}$ et que \bar{d} est constant pour $X > 0,25$.

3°) $Pe = f(Re_0)$: fig(4)

Nous rappelons que le reynolds $Re_0 = \frac{u_0 \bar{d}}{D_r}$ est défini à partir de la vitesse en fut vide u_0 et du diamètre moyen \bar{d} des billes. Cette courbe nous semble assez exploitable. En effet nous relevons une séparation entre d'une part les différents mélanges et les grosses billes d'autre part. Quant aux petites billes, leur comportement est voisin

de celui des mélanges. Ceci est dû au fait que les diamètres \bar{d} et d_I sont du même ordre de grandeur. Il faut remarquer par contre que les grosses billes donnent lieu à de fortes valeurs du Peclet et du Reynolds. Celles-ci se placent alors à l'extrême droite du graphique.

Peut-on renoncer à obtenir une courbe continue dans le plan $Pe=f(Re)$ (comme l'auraient donné des sphères pures: voir travaux de Hartman et de Latinen)? En ce qui nous concerne (sous réserve de l'exactitude des mesures expérimentales), nous pouvons dire:

Etant donné une certaine catégorie de grosses billes, elles donneront, dans un certain domaine d'écoulement, des valeurs de Pe et de Re très élevées. Mais dès que ^{l'on} ajoutera une quantité de petites billes (en supposant le mélange réalisé homogène) le diamètre moyen des billes aura considérablement diminué et pour le même écoulement, le Re et le Pe passeront sans transition à des valeurs bien plus faibles. Ainsi, si du point ^{de vue} théorique il y a continuité, celle-ci est difficile à mettre en évidence expérimentalement étant donné la non possibilité de réaliser des mélanges homogènes dont la teneur en petites billes est inférieure à 20%. Nous remarquons également une légère séparation pour X voisin de 1 (petites billes seules) puisque le Peclet correspondant est assez élevé (comparé à ceux obtenus pour les autres mélanges).

En résumé nous pouvons dire qu'il est difficile d'obtenir une courbe continue dans le plan $Pe=f(Re)$ mais sensiblement trois groupes de points qui se répartissent comme suit:

- les grosses billes seules (fortes valeurs de Pe et de Re)
- les mélanges de billes tels que : $0,2 < X < 0,8$
- les petites billes seules ??

Mais ce qui nous "choque" le plus c'est qu'il ne semble pas y avoir de correspondance biunivoque entre le Peclet et le Reynolds. En effet nous obtenons très approximativement le même Reynolds et deux valeurs différentes du Peclet pour deux compositions différentes du garnissage comme le montre le tableau suivant:

X	H_I	Pe	Re
0	5	II,05	40
0,2	15	I,75	40

4°) Conclusion:

Les conclusions tirées se résument alors en ceci:

Le mélange de diamètre moyen \bar{d} ne peut se comporter comme un garnissage constitué par des billes pures et de diamètre réel d . Aussi serait-il préférable, si l'on veut étudier la dispersion dans les mélanges de billes, de voir séparément l'influence de \bar{d} et de u sur cette dispersion. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

II) COMPARAISON AVEC LA LITTÉRATURE (fig: 13)

Pour l'étude de la dispersion dans des mélanges binaires de billes, nous n'avons trouvé que les travaux de LOURY(5). Pour les sphères pures les principaux résultats sont donnés par HARTMAN, WEVERS et KRALARS pour les petites billes et par LATINEN(7) pour les grosses billes. Enfin HIBY(4) rassemble leurs résultats et donne une courbe pour des billes de diamètre variant de 0,5 mm à 8 mm.

Nous constatons que pour les billes de 4 mm, nos résultats se placent au voisinage de la courbe de LATINEN. De même les résultats relatifs aux petites billes se placent au voisinage de celle de HARTMAN.

Quant au mélange son comportement est le suivant:
partant de grosses billes seules, on se déplace sur la courbe de LA-
TINEN. Dès que l'on ajoute une certaine quantité de petites billes
on quitte cette courbe. Quand il ne reste que les petites billes seu-
les on revient sur la courbe de HARTMAN .

B) ETUDE DU COEFFICIENT DE DISPERSION RADIALE

I) COURBES

Nous avons jugé utile de représenter et d'étudier les réseaux des courbes suivantes:

$$-D_r = f(X) \text{ sur la figure (5)}$$

$$-D_r = f(R_0) \text{ " " " (6)}$$

$$-D_r = f(u) \text{ " " " (7)}$$

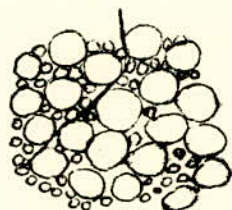
Etant donné que tous les débits conduisent au même type de courbes et pour des raisons de clarté, nous ne représenterons que celles correspondant à deux débits ($H=5$ et $H=20$).

II) COMMENTAIRES DE COURBES

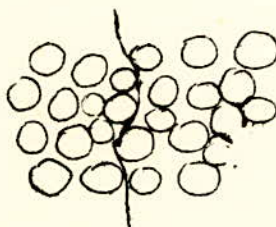
I°) $D_r = f(X)$ (fig: 5)

Pour les débits faibles et forts (respectivement $H=5$, soit $0,48$ l/mn et $H=20$ soit $1,5$ l/mn) nous notons sur ce réseau la présence d'un maximum du coefficient de dispersion D_r . Ce maximum est obtenu pour X voisin de 20% , mais fait remarquable, pour cette valeur de X la porosité du mélange passe par son minimum (soit $e=0,279$).

Nous expliquons ce phénomène par les deux schémas suivants:



Porosité e minimum : D_r élevé



Porosité e élevée : D_r faible

En effet lorsque la porosité e est petite, le mélange de billes correspondant est très compact: les filets de fluide au sein du garnissage sont très fins mais leur trajectoire est tourmentée, il en résulte nécessairement une dispersion importante. Par contre quand la porosité e est grande, le mélange correspondant est peu compact, les filets de fluide sont certainement plus gros mais leur trajectoire sera relativement peu perturbée par ces obstacles: il en résulte donc une dispersion radiale plus faible. C'est ainsi que nous expliquons la présence de ce maximum de D_r sur le réseau $D_r = f(X)$.

2°) $D_r = f(u)$ (fig: 7)

Pour différentes compositions le réseau $D_r = f(u)$ montre évidemment que le coefficient de dispersion D_r augmente avec la vitesse u dans le garnissage. Nous notons aussi que ces courbes s'extrapolent vers l'origine, ce qui est normal puisque nous avons négligé le coefficient de dispersion moléculaire. Il faut remarquer également que les grandes valeurs de D_r sont obtenues pour une composition $X=0,20$.

3°) $D_r = f(Re_0)$ (fig: 6)

L'étude de ce réseau de courbes, pour un débit unique $H=20$, mène aux conclusions suivantes:

- Nous retrouvons la différence de comportement entre d'une part, les grosses billes et les mélanges d'autre part. Les raisons de cela ont été exposées dans la discussion du réseau des courbes $Pe = f(Re_0)$ (influence importante du diamètre d_2 des grosses billes).

- Nous remarquons que le fait d'ajouter approximativement 20% de petites billes dans les grosses, permet avec le même Reynolds (c'est à dire qu'il faut augmenter la vitesse d'écoulement principal) ~~comme~~ une dispersion beaucoup plus importante.

- Enfin nous constatons que pour un même Reynolds, le coefficient de dispersion varie en raison ^{inverse} du diamètre des billes comme l'illustre le tableau suivant:

Re	Diamètre	D_r (cm^2/s)
16,1	0,1	$5,27 \cdot 10^{-2}$
16,15	0,4	$3,67 \cdot 10^{-2}$

A.) APLICATION A L'ETUDE DU LIBRE PARCOURS MOYEN

I) RAPPELS

Nous avons vu dans la partie " Bases Théoriques" que les travaux de LE GOFF , LESPINASSE et PROST (I), en se basant sur une interprétation statistique de la diffusion et en supposant un écoulement isotrope c'est à dire en l'absence de chemins préférentiels, ont conduit aux expressions suivantes:

$$2 X_m^2 = T_o b Z d_g$$

$$D = \frac{X_m^2}{2 t_g}$$

$$T_o b = \frac{4}{P_e}$$

D'autre part la littérature donne à T_o la valeur $1,5 \pm 0,2$, valeur que nous nous proposons de vérifier en utilisant nos résultats. Pour cela nous donnerons, tour à tour, un rôle prépondérant aux petites et aux grosses billes.

II) PREMIERE HYPOTHESE

I) Analyse des résultats :

Dans cette première hypothèse nous supposons que malgré tout ce ne sont pas essentiellement les grosses billes qui constituent les obstacles importants. En effet les obstacles causés par les grosses billes sont relativement faibles devant ceux créés par les petites qui, elles, remplissent tous les interstices laissés libres. Dans de telles conditions nous supposons que c'est le diamètre hydraulique de pore d_p , où interviennent essentiellement les petites billes, qui détermine le libre parcours moyen λ . Nous posons alors $\lambda = d_p$.

Or $\lambda = b \bar{d}$ et $\bar{d} = \frac{3}{2} \frac{(1 - e)}{e} d_p$

On en déduit successivement :

$$\frac{3}{2} \frac{b(I-e)}{e} = I \quad \longrightarrow \quad b = \frac{2}{3} \frac{e}{(I-e)}$$

La relation $T_0 b = \frac{4}{P_e}$ devient alors :

$$T_0 = \frac{4}{P_e} \frac{3(I-e)}{2e} = 6 \frac{(I-e)}{e} \frac{I}{P_e}$$

soit

$$T_0 = 6 \frac{(I-e)}{e} \frac{I}{P_e}$$

Toutes les grandeurs du second membre étant connues, nous pouvons calculer le facteur de tortuosité T_0 . Pour vérifier notre hypothèse c'est à dire vérifier que T_0 reste voisin de l'unité, nous allons étudier $T_0 = f(X)$. Les différentes valeurs de T_0 , obtenues pour deux débits différents ($H_I = 5$ et $H_I = 20$), sont rassemblées dans le tableau ci-dessous:

X	0,0	0,202	0,48	0,58	0,68	1,0
$\frac{(I-e)}{e}$	1,5	2,585	2,335	2,275	1,667	1,535
T_0 $H_I=5$	0,815 ⁺	10,85	4,84	3,03	2,11	2,08
T_0 $H_I=20$	0,163 ⁺	8,15	3,45	2,54	1,795	1,28

2°) Conclusion:

Tout d'abord nous remarquons deux valeurs de T_0 inférieures à l'unité. Ceci à priori n'a pas de sens, mais il faut tenir compte du fait que l'on a donné le rôle principal aux petites billes alors que ces deux valeurs correspondent précisément à $X = 0$, donc aux grosses billes seules. Mais l'importante variation de T_0 (de 10 à 1) montre que notre hypothèse de départ n'est pas justifiée. Elle ne peut par consé-

quent être appliquée pour déterminer le paramètre T_0 , lequel donnerait le libre parcours moyen λ .

III) DEUXIEME HYPOTHESE :

I°) Analyse ces résultats :

Si dans la première hypothèse nous avons minimisé le rôle des grosses billes, nous leur donnons dans la seconde, un rôle prépondérant. En effet il est plus normal de supposer qu'au sein du garnissage, c'est la présence des grosses billes qui fixe les valeurs du libre parcours moyen λ . Il faut remarquer que la variation de la composition du mélange, c'est à dire la variation du diamètre hydraulique de pore d_p ne fait guère varier λ qui, somme toute, restera déterminé par le diamètre des grosses billes.

Etant donné que λ reste essentiellement fixé par d_2 , c'est la quantité $\frac{\lambda}{d_2}$ qui devrait rester constante. A cet effet nous reprenons la relation initiale $T_0 b = \frac{4}{Pe}$ et nous supposons T_0 constant et égal à 1,5.

Ceci étant, nous calculons les quantités suivantes (que nos résultats permettent d'obtenir), lesquelles nous permettent de vérifier les valeurs de $\frac{\lambda}{d_2}$. Ces quantités sont résumées dans le tableau ci-dessous:

$\frac{\lambda}{d_p} = \frac{4}{Pe}$	$\frac{\lambda}{\bar{d}} = \frac{4}{1,5 Pe}$	$\frac{\lambda}{d_2} = \frac{\lambda}{\bar{d}} \frac{\bar{d}}{d_2}$
--------------------------------------	--	---

Nous remarquons que les seconds membres de ces quantités sont connus. Les valeurs de $\frac{\lambda}{d_2}$ portées dans les tableaux suivants correspondent à deux débits : $d_2^{H_I} = 5$ et $H_I = 20$.

a) $H_I = 5$ (débit faible):

X	0,0	0,202	0,48	0,58	0,68	1,0
λ/a_p	0,362	1,64	1,375	0,89	0,84	0,9
λ/\bar{a}	0,242	1,1	0,918	0,593	0,56	0,6
\bar{a}/a_2	1,0	0,287	0,262	0,255	0,252	0,25
λ/a_2	0,242	0,315	0,241	0,151	0,142	0,15

b) $H_I = 20$ (débit fort):

X	0,0	0,202	0,48	0,58	0,68	1,0
λ/a_p	0,12	1,37	0,987	0,745	0,718	0,635
λ/\bar{a}	0,085	0,917	0,658	0,496	0,478	0,423
\bar{a}/a_2	1,0	0,287	0,262	0,255	0,252	0,25
λ/a_2	0,085	0,263	0,173	0,127	0,125	0,110

2°) Conclusion:

L'observation des deux tableaux précédents montre que si la quantité $\frac{\lambda}{d_p}$ varie beaucoup, $\frac{\lambda}{a_2}$ par contre reste relativement constant.

Une fois de plus, sous réserve de l'exactitude de nos mesures expérimentales, nous pouvons conclure en disant que le libre parcours moyen est déterminé principalement par le diamètre des grosses billes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Compte tenu des résultats que nous avons obtenus, nous pouvons dire :

1°) Il est strictement nécessaire de travailler avec un fluide principal exempt de gaz.

2°) Il n'est sans doute pas possible d'obtenir, pour un mélange, une courbe continue $P_{er}=f(Re)$ pour une composition variant de 0 à 100%. Cela signifie que Re ne semble pas être un paramètre convenable pour représenter le phénomène dans le cas d'un mélange.

3°) Le coefficient de dispersion radiale passe par un maximum, lorsque la composition du mélange est celle qui donne une porosité minimum.

4°) Ce sont les grosses billes qui jouent le rôle prépondérant dans l'écoulement et semblent particulièrement fixer la valeur du libre parcours moyen d'un agrégat de fluide.

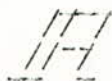
5°) L'interprétation de l'écoulement d'un fluide par un mécanisme diffusionnel isotrope au sein d'un garnissage, conduit à des résultats acceptables pour la seconde hypothèse (importance donnée aux grosses billes). Quant aux écarts observés sur $\frac{\Delta}{d_2}$, ils peuvent s'expliquer d'une part, par la présence de petites billes qui modifient les trajectoires des filets et par l'existence de chemins préférentiels, d'autre part.

A cet effet nous signalons que LESPINASSE (1), en étudiant les fluctuations de débits et de concentration dans une colonne par absorption gaz-liquide à contre-courant, a pu mettre en évidence la présence de ces chemins préférentiels.



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

- (1) LESPINASSE : Thèse Université de Nancy (1962): rôle des chemins préférentiels d'écoulement du liquide.
Industries Chimiques Belges .N°II. 1964 *✓ pag?*
- (2) PROST : Thèse Université de Nancy : Texture du liquide.
Chimie et Industrie, Génie Chimique .1964, 9I, 6.
- (3) HARTMAN, NEVERS, KRALLARS: Latéral Diffusion with liquide flow through a packed bed of ion-exchange particles.
Chem .Eng. Scie. 1958.9 . 80 .
- (4) J.W.HIBY : Longitudinal and Transverse mixing during single phase flow through granular beds.
Ind .of Chem.Eng; London 1962.
- (5) LOURY : Thèse Université de Nancy (1968).
- (6) LEVENSPIEL : Chemical Reaction Engineering *✓ —*
- (7) LATINEN : Mechanisms of fluid phase mixing in fixed bed of uniformly sized spherical particles .
- (8) LE GOFF : Les critères adimensionnels (cours de Génie Chimique)
- (9) BIRD : Transfert de matière (Transport Phenomena)
- (10) LAM D.E. et WILHELM R.H :
Etude du mélangeage au sein d'un liquide unique s'écoulant à travers un garnissage.
Ind. Eng.Chem.(Fundamentals) 2 . 1963, 173 ,182.
- (II) SINCLAIR and POTTER:
The dispersion of gas in flow through a bed of packed solids.
Chem . Eng . Scie .
- (12) ADRIAAN KLINKENBERG :
Diffusion in a fluid Moving at uniform velocity in a tube .
Royal Dutch Shell LABORATORY. Amsterdam .



N N E X E S

- EXEMPLE DE CALCUL D'ERREUR
- SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL
- COURBES

 EXEMPLE DE CALCUL D'ERREUR APPLIQUE AU P_{er} ET AU D_r

I) Calcul de $\frac{\Delta P_e}{P_e}$

Nous rappelons que

$$P_e = S \bar{d} Z$$

Avec:

S = pente de la droite $\log C = f(r^2)$

Z = distance injection-électrode

\bar{d} = diamètre moyen des particules

il vient :

$$\frac{\delta P_e}{P_e} = \frac{\delta S}{S} + \frac{\delta \bar{d}}{\bar{d}} + \frac{\delta Z}{Z}$$

soit en passant aux incertitudes

$$\frac{\Delta P_e}{P_e} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \bar{d}}{\bar{d}} + \frac{\Delta Z}{Z}$$

a) Calcul de $\frac{\Delta S}{S}$

Les travaux de SINCLAIR et POTTER, en utilisant le rapport des concentrations au centre et à la paroi de la colonne, ont montré que tant que celui-ci reste inférieur à 10, l'erreur relative sur la pente S est de l'ordre de 1%. Soit

$$\frac{\Delta S}{S} = 0,01$$

b) Calcul de $\frac{\Delta Z}{Z}$

D'après les manipulations que nous avons effectuées, nous estimons que l'erreur que l'on peut faire est de l'ordre de $\pm 0,5$ cm.

Nous obtenons :

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{0,5}{30} = 0,0166$$

c) Calcul de $\frac{\Delta \bar{d}}{\bar{d}}$

En remarquant que \bar{d} a pour expression:

$$\bar{d} = \frac{\frac{X_1}{d_1^2} + \frac{X_2}{d_2^2}}{\frac{X_1}{d_1^3} + \frac{X_2}{d_2^3}}$$

il vient:

$$\frac{\delta \bar{d}}{\bar{d}} = \frac{\delta \left[\frac{X_1}{d_1^2} + \frac{X_2}{d_2^2} \right]}{\frac{X_1}{d_1^2} + \frac{X_2}{d_2^2}} - \frac{\delta \left[\frac{X_1}{d_1^3} + \frac{X_2}{d_2^3} \right]}{\frac{X_1}{d_1^3} + \frac{X_2}{d_2^3}}$$

en posant :

$$A = \frac{X_1}{d_1^2} + \frac{X_2}{d_2^2} \quad \text{et} \quad B = \frac{X_1}{d_1^3} + \frac{X_2}{d_2^3}$$

$$\text{Puis: } \left(\frac{X_1}{d_1^2} \right) \quad \left(\frac{X_2}{d_2^2} \right) \quad \left(\frac{X_1}{d_1^3} \right) \quad \left(\frac{X_2}{d_2^3} \right)$$

$$A_1 = \frac{X_1}{d_1^2} ; \quad A_2 = \frac{X_2}{d_2^2} ; \quad B_1 = \frac{X_1}{d_1^3} ; \quad B_2 = \frac{X_2}{d_2^3}$$

nous obtenons:

$$\frac{\delta \bar{d}}{\bar{d}} = A_1 \left[\frac{\delta X_1}{X_1} - 2 \frac{\delta d_1}{d_1} \right] + A_2 \left[\frac{\delta X_2}{X_2} - 2 \frac{\delta d_2}{d_2} \right]$$

$$- B_1 \left[\frac{\delta X_1}{X_1} - 3 \frac{\delta d_1}{d_1} \right] - B_2 \left[\frac{\delta X_2}{X_2} - 3 \frac{\delta d_2}{d_2} \right]$$

$$\frac{\delta \bar{d}}{\bar{d}} = \frac{\delta X_1}{X_1} (A_1 - B_1) + \frac{\delta d_1}{d_1} (3B_1 - 2A_1) + \frac{\delta X_2}{X_2} (A_2 - B_2) + \frac{\delta d_2}{d_2} (3B_2 - 2A_2)$$

soit en passant aux valeurs absolues:

$$\frac{\Delta \bar{d}}{\bar{d}} = \frac{\Delta X_I}{X_I} \left| A_I - B_I \right| + \frac{\Delta d_I}{d_I} \left| 3B_I - 2A_I \right| + \frac{\Delta X_2}{X_2} \left| A_2 - B_2 \right| + \frac{\Delta d_2}{d_2} \left| 3B_2 - 2A_2 \right|$$

I°) calcul de $\frac{\Delta X_I}{X_I}$ et de $\frac{\Delta X_2}{X_2}$

nous savons que

$$X_I = \frac{V_I}{V_I + V_2}$$

d'où

$$\begin{aligned} \frac{\delta X_I}{X_I} &= \frac{\delta V}{V_I} - \frac{\delta (V_I + V_2)}{V_I + V_2} = \delta V_I \left[\frac{I}{V_I} - \frac{I}{V_I + V_2} \right] - \frac{\delta V_2}{V_I + V_2} \\ &= \frac{I}{V_I + V_2} \left[\frac{V_2}{V_I} \delta V_I - \delta V_2 \right] \end{aligned}$$

Soit :

$$\frac{\Delta X_I}{X_I} = \frac{I}{V_I + V_2} \left[\frac{V_2}{V_I} \Delta V_I + \Delta V_2 \right]$$

De même

$$\frac{\Delta X_2}{X_2} = \frac{I}{V_I + V_2} \left[\frac{V_I}{V_2} \Delta V_2 + \Delta V_I \right]$$

D'autre part nous avons :

$$V_I = \frac{M_I}{\rho_I} \quad \text{et} \quad V_2 = \frac{M_2}{\rho_2}$$

Avec M_I , M_2 , ρ_I et ρ_2 respectivement les masses et densités des billes (I) et (2) constituant l'échantillon de garnissage.

On en déduit facilement :

$$\frac{\Delta V_I}{V_I} = \frac{\Delta M_I}{M_I} + \frac{\Delta \rho_I}{\rho_I}$$

De même

$$\frac{\Delta V_2}{V_2} = \frac{\Delta M_2}{M_2} + \frac{\Delta \rho_2}{\rho_2}$$

Données numériques:

Nous utiliserons les résultats relatifs à :

$$X = 0,58 ; e = 0,305 ; Z = 30 \text{ cm} ; \bar{d} = 0,102 \text{ cm}$$

Nous en tirons:

$X_I = 0,58$	$X_2 = 0,42$
$M_I = 1118 \text{ g}$	$M_2 = 803 \text{ g}$
$V_I = 396 \text{ cm}^3$	$V_2 = 287 \text{ cm}^3$
$d_I = 0,1 \text{ cm}$	$d_2 = 0,4 \text{ cm}$
$\rho_I = 2,82 \text{ g/cm}^3$	$\rho_2 = 2,800 \text{ g/cm}^3$
$\Delta M_I = \pm 1 \text{ g}$	$\Delta M_2 = \pm 1 \text{ g}$
$\Delta \rho_I = 0,01 \text{ g/cm}^3$	$\Delta \rho_2 = 0,01 \text{ g/cm}^3$
$\Delta d_I = 0,01 \text{ cm}$	$\Delta d_2 = 0,01 \text{ cm}$
$Z = 30 \text{ cm}$	$\Delta Z = 0,5 \text{ cm}$
$u = 4,47 \text{ cm/s}$	$Pe = 5,36$

Application numérique

$$\bullet) \frac{\Delta V_I}{V_I} = 4,45 \cdot 10^{-3} \quad \longrightarrow \quad \Delta V_I = 1,76 \text{ cm}^3$$

$$\bullet) \frac{\Delta V_2}{V_2} = 4,815 \cdot 10^{-3} \quad \longrightarrow \quad \Delta V_2 = 1,38 \text{ cm}^3$$

$$\bullet) \frac{\Delta X_I}{X_I} = 3,88 \cdot 10^{-3}$$

$$\bullet) \frac{\Delta X_2}{X_2} = 5,35 \cdot 10^{-3}$$

$$\bullet) \frac{\Delta d_I}{d_I} = 0,1$$

$$\bullet) \frac{\Delta d_2}{d_2} = 0,025$$

$$\bullet) \left| A_I - B_I \right| = 0,04$$

$$\bullet) \left| A_2 - B_2 \right| = 0,032$$

$$\bullet) \left| 3B_I - 2A_I \right| = 0,76$$

$$\bullet) \left| 3B_2 - 2A_2 \right| = 0,053$$

On en déduit :

$$\frac{\Delta \bar{d}}{\bar{d}} = 0,078$$

donc

$$\frac{\Delta P_e}{P_e} = 0,01 + 0,078 + 0,0166 = 0,1046$$

Finalement :

$$\boxed{\frac{\Delta P_e}{P_e} = 0,1}$$

II) Calcul de $\frac{\Delta D_r}{D_r}$

Compte tenu de ce que $D_r = \frac{u \bar{d}}{P_e}$, il vient :

$$\frac{\delta D_r}{D_r} = \frac{\delta u}{u} + \frac{\delta \bar{d}}{\bar{d}} - \frac{\delta P_e}{P_e} = \frac{\delta u}{u} - \frac{\delta S}{S} - \frac{\delta Z}{Z}$$

Soit :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{\Delta u}{u} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta Z}{Z}$$

L'erreur faite sur la lecture du rotamètre est estimée à cinq divisions (soit 5 mm) . Si S_e est la section de la colonne, nous obtenons (Q étant le débit de fluide principal)

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta S_e}{S_e}$$

Comme $\frac{\Delta S_e}{S_e} = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta Q}{Q}$

5 mm \longleftrightarrow $\Delta Q = 0,8 \text{ cm}^3$ et avec $Q = 25,2 \text{ cm}^3/\text{s}$

D'où $\frac{\Delta u}{u} = \frac{0,8}{25,2} = 3,18$

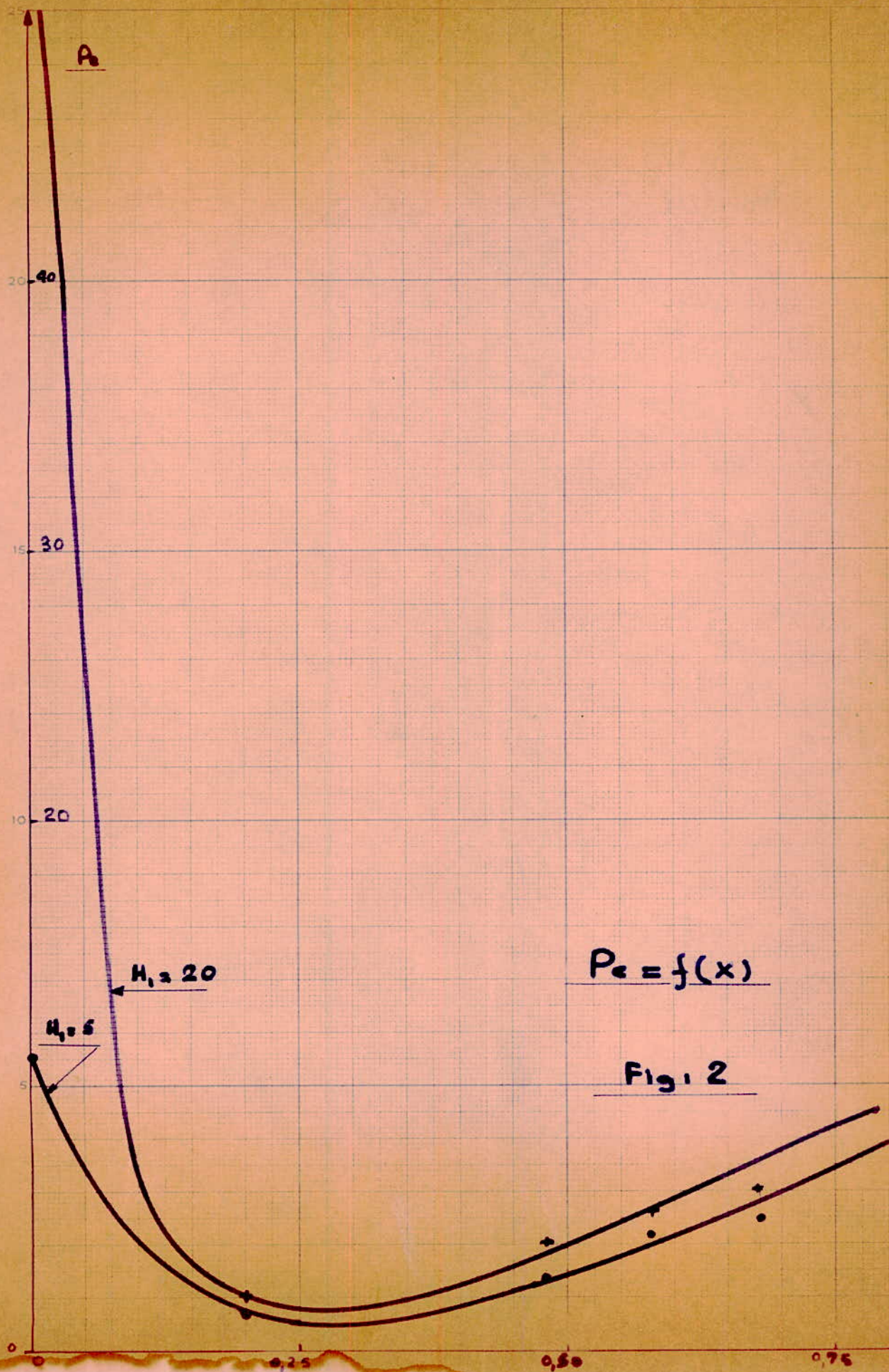
soit $\frac{\Delta D_r}{D_r} = 0,032 + 0,01 + 0,0166$

Finalement

$$\boxed{\frac{\Delta D_r}{D_r} = 0,06}$$

Conclusion:

Les erreurs étant de l'ordre de 10% , nous les estimons satisfaisantes . Nous remarquons que l'erreur principale est faite sur le diamètre moyen des particules \bar{d} .



$P_e = f(x)$

Fig. 2

$\frac{U}{D_r} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$

200

150

100

50

$\frac{U}{D_r} = f(X)$

+ Débit $H_1 = 20$
• " $H_1 = 5$

Fig: 3

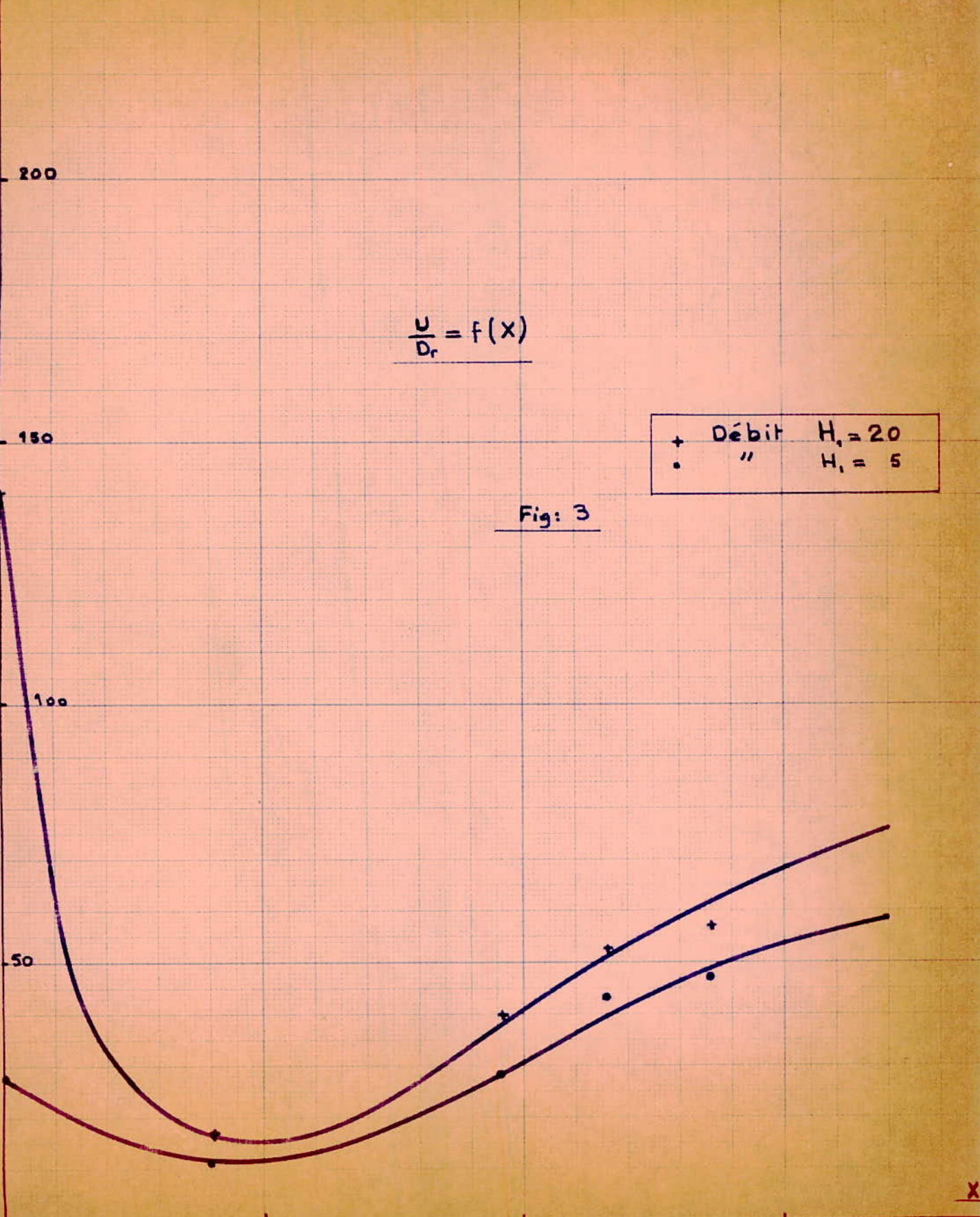
0

0,25

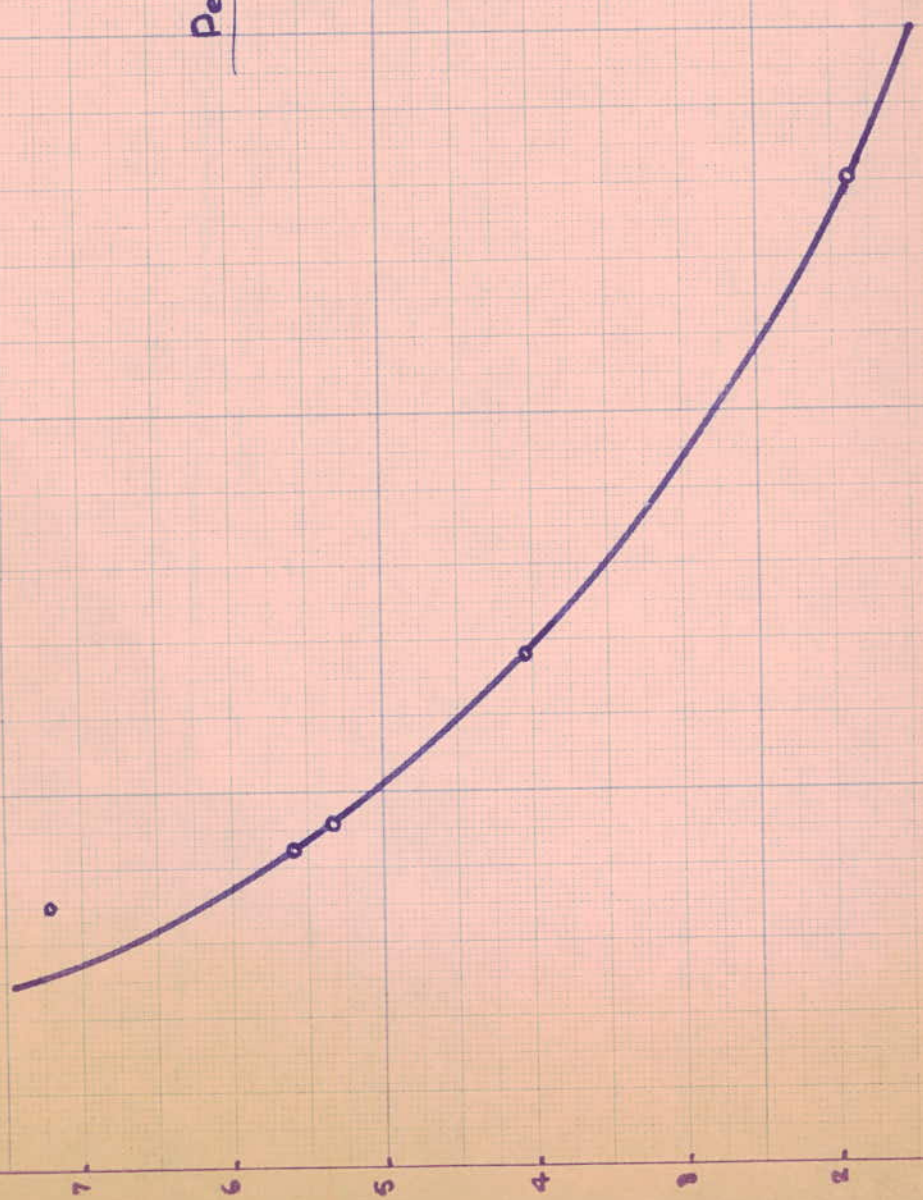
0,5

0,75

X



$\frac{Pe}{55}$

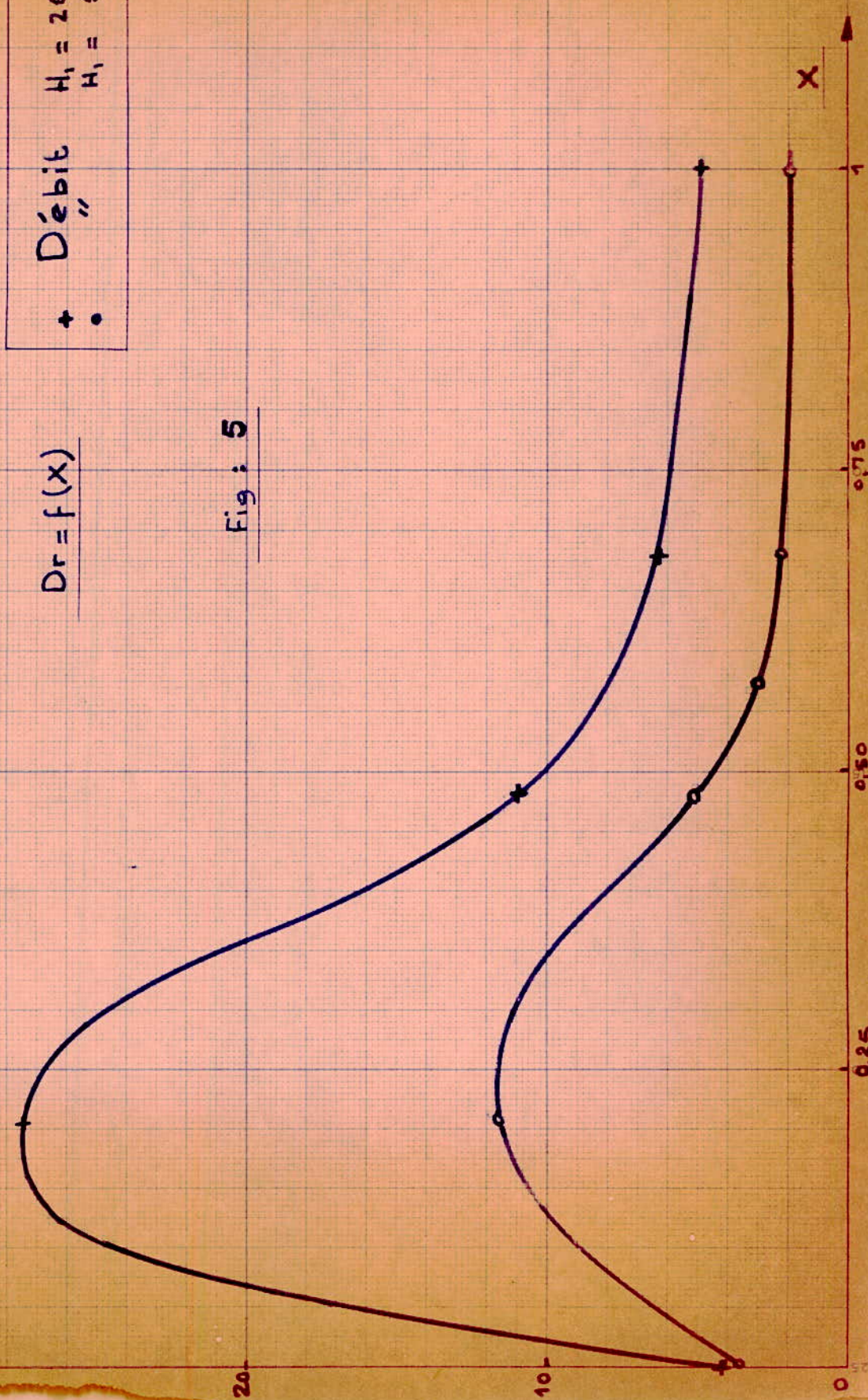


$Pe = f(Re_0) \quad (H_1 = 20)$

Fig: 4

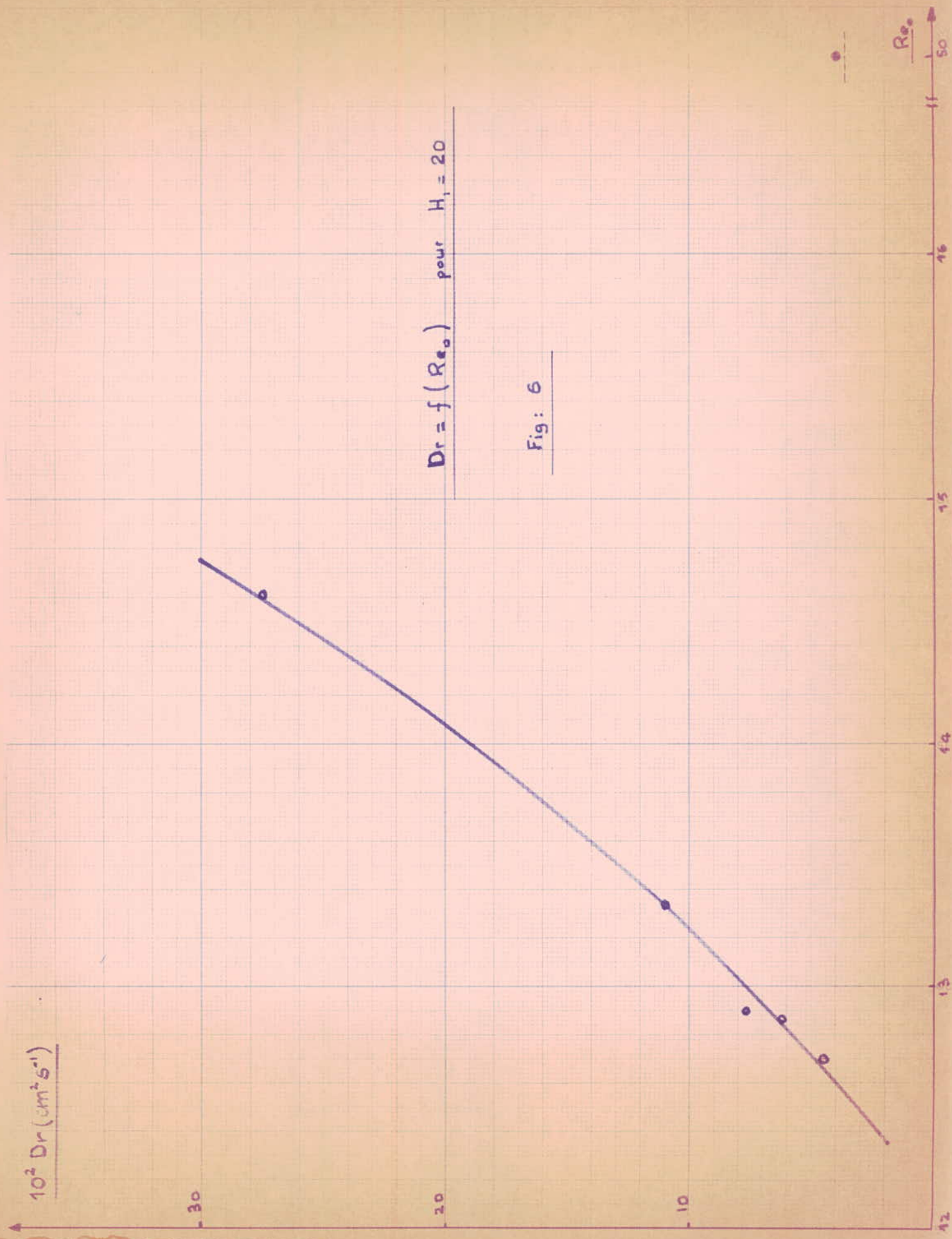
$\frac{Re_0}{50}$

$10^2 D_r \text{ (cm}^2\text{s}^{-1}\text{)}$



$D_r = f(x)$

Fig : 5



$10^2 D_r (\text{cm}^2 \text{s}^{-1})$

$D_r = f(Re_0)$ pour $H_1 = 20$

Fig: 6

Re_0

17

16

15

14

13

12

$10^3 D_r \text{ (cm}^2\text{s}^{-1}\text{)}$

30

20

10

0

$D_r = f(u)$

Fig: 7

$X = 0,2$

$X = 0,4$

$X = 1$

$X = 0$

u

(cm/s)

• • • •

• • • •

• • • •

\bar{d} (cm)

20 0,4

15 0,3

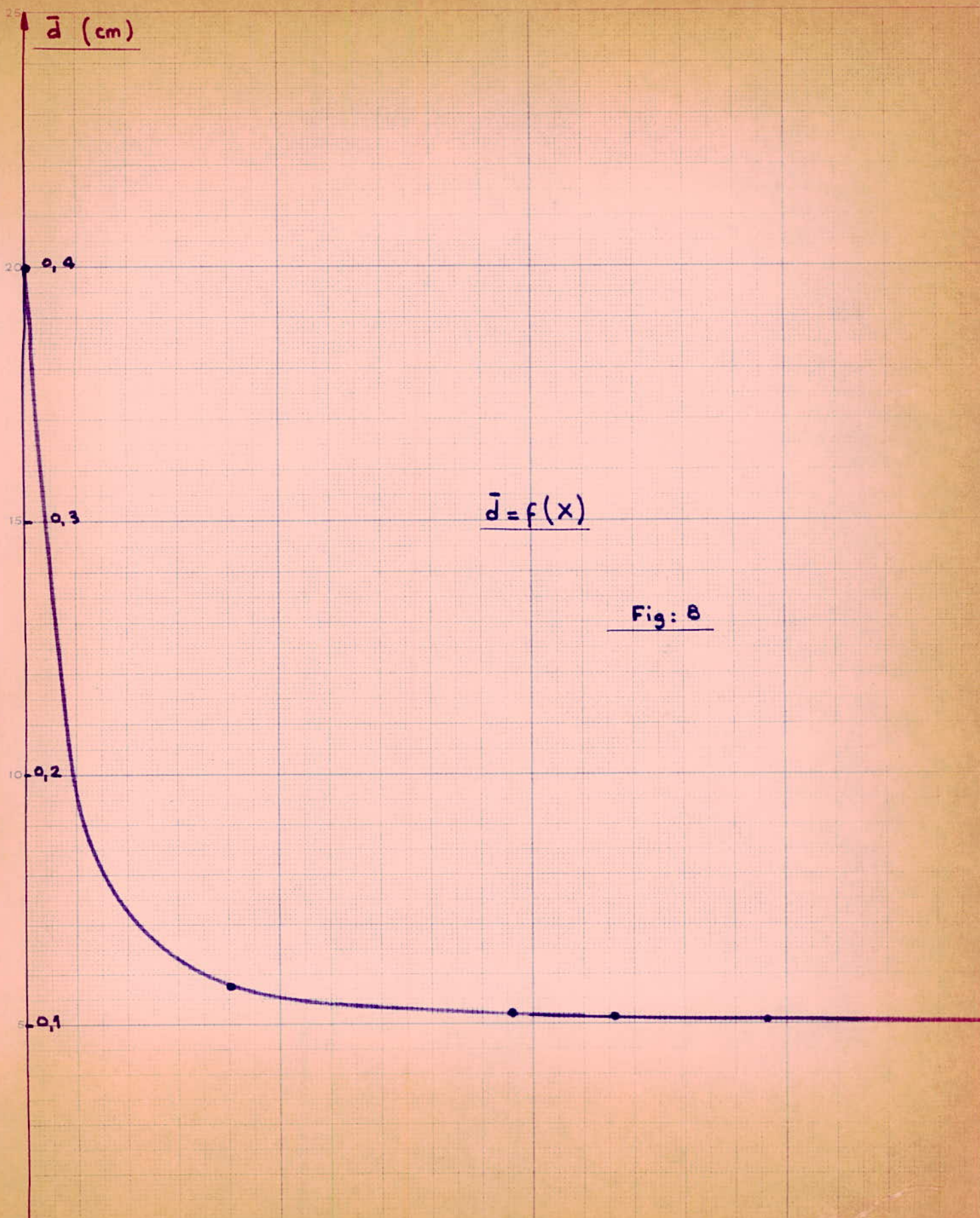
10 0,2

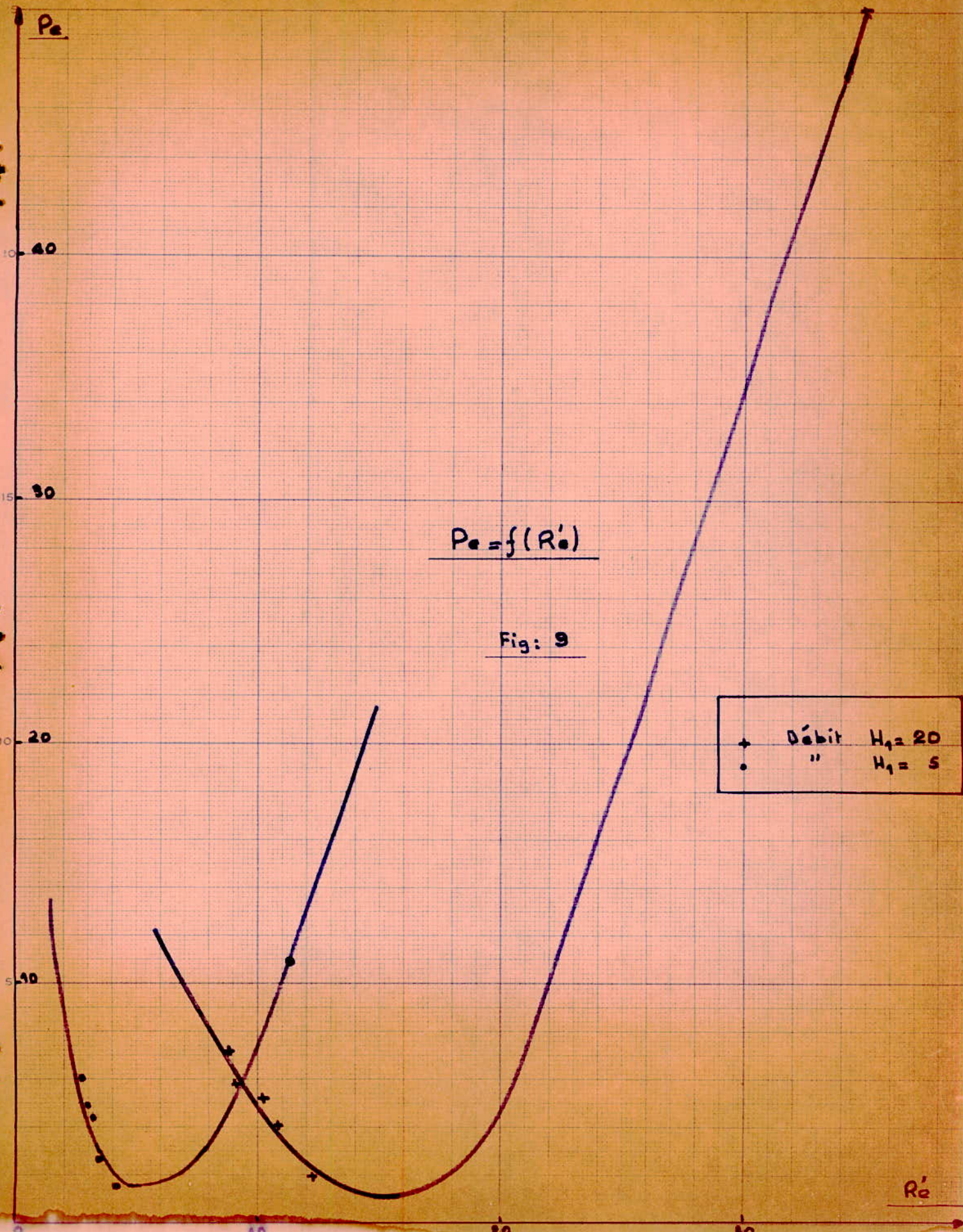
5 0,1

$\bar{d} = f(x)$

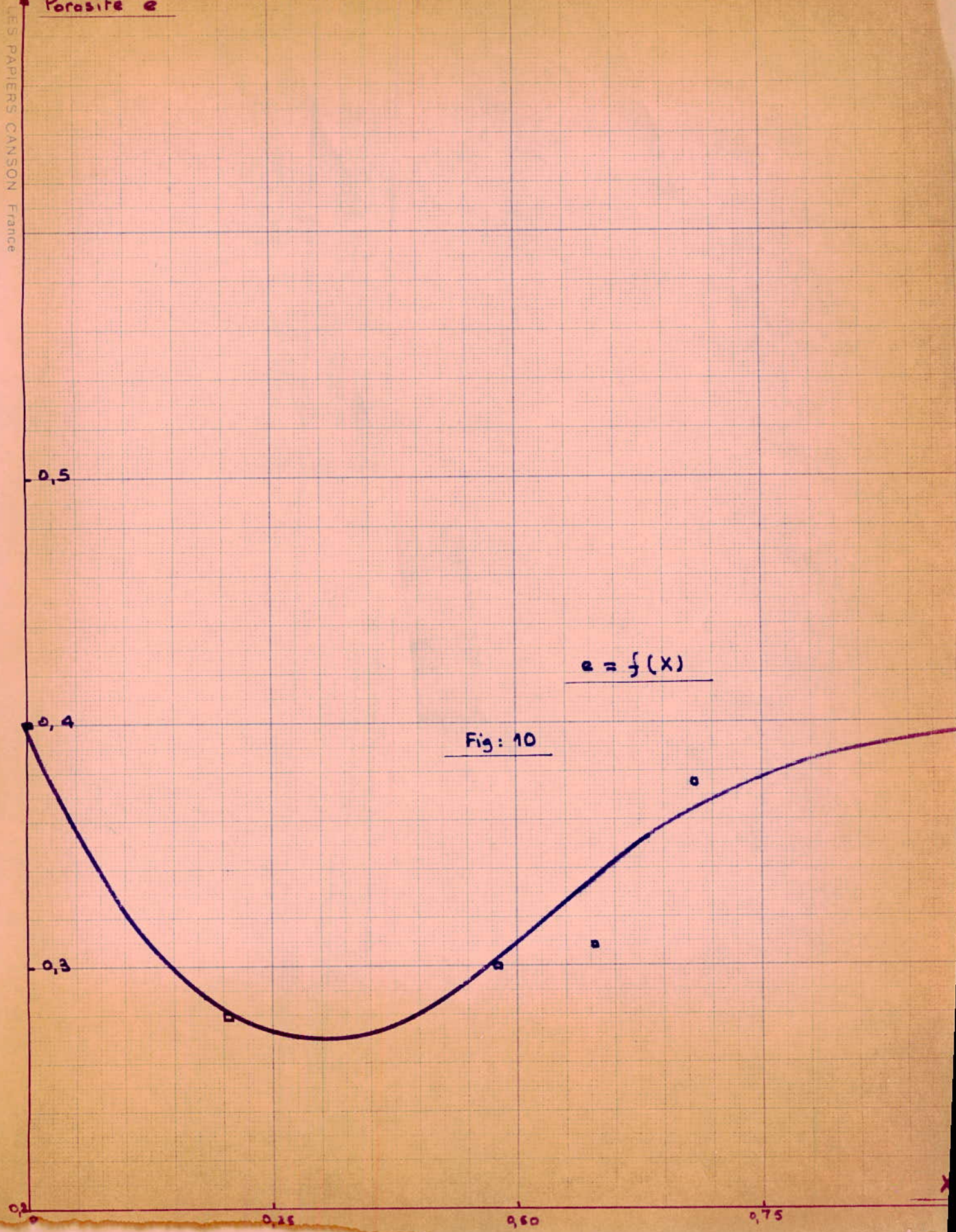
Fig: 8

0 0,25 0,5 0,75 X



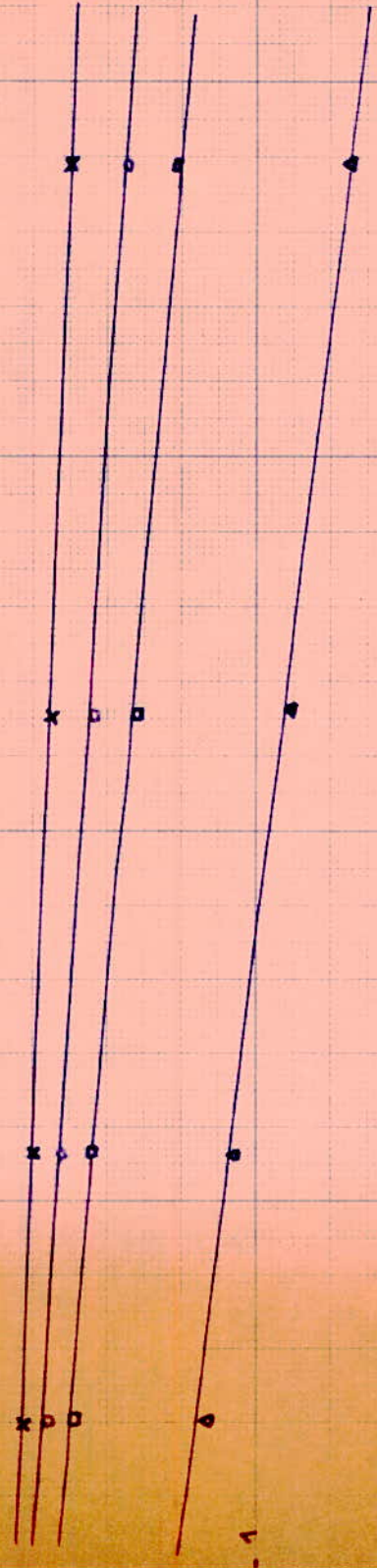


Porosité e



$\log \frac{y_i}{y_j}$

-1,5



$Z = 30$	$e = 0,40$	$\bar{d} = 0,4 \mu$
Symbols	Debits	S
x	0,48 /mm.	0,01
o	0,80 "	0,03
□	1,51 "	0,05
△	3,80 "	0,07

Fig: 11

r^2
(cm^2)

1

2

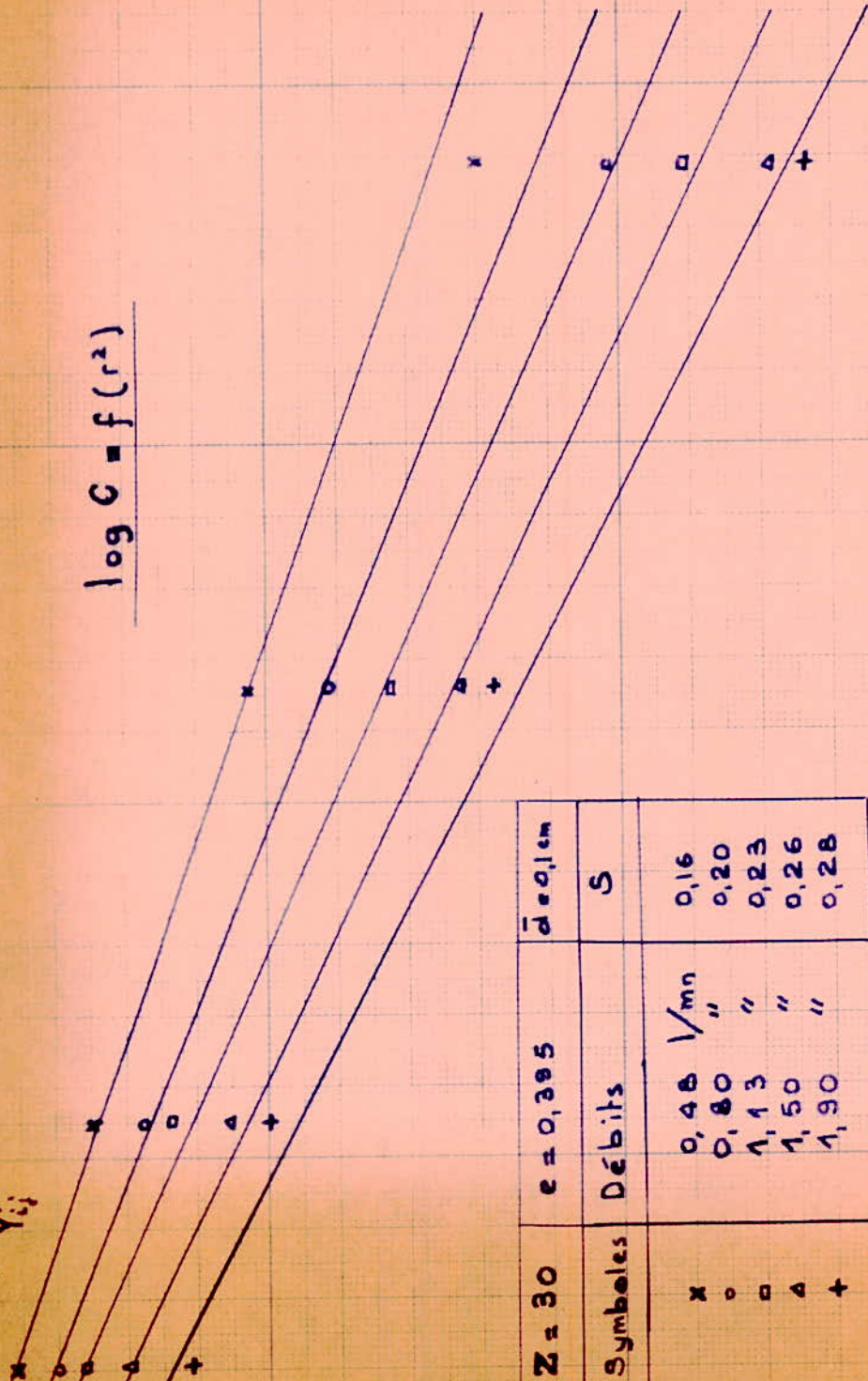
3

-0,5

-1

$$\log \frac{Y_2}{Y_1}$$

$$\log C = f(r^2)$$



Z = 30	e = 0,395	\bar{d} en cm
Symboles	Débits	S
x	0,48 l/mn	0,16
o	0,80 "	0,20
□	1,13 "	0,23
△	1,50 "	0,26
+	1,90 "	0,28

Fig: 12

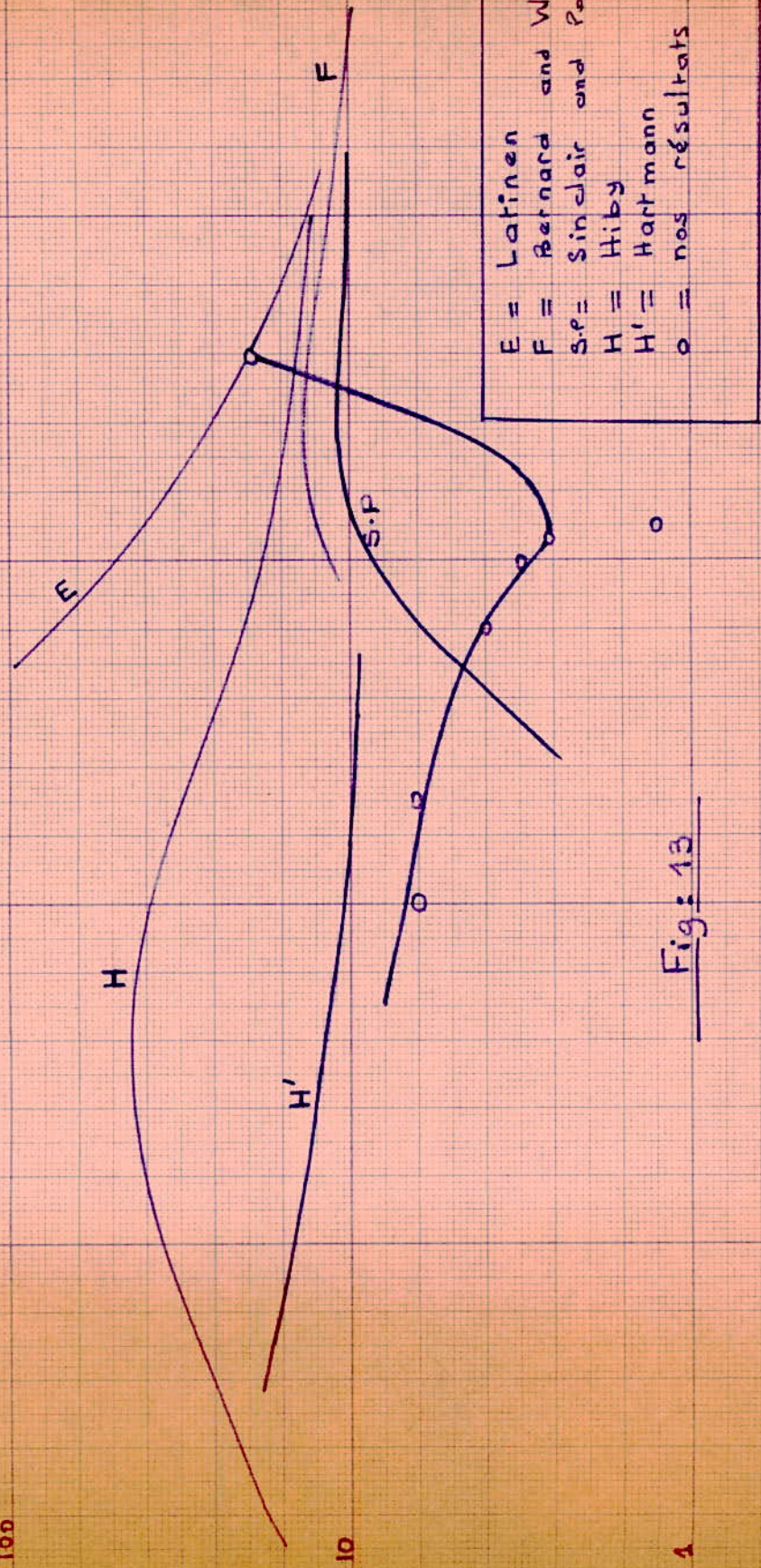
(cm²)r²

Pe

100

10

1



E = Latinen
 F = Bernard and Wilhelm
 S.P. = Sinclair and Patter
 H = Hiby
 H' = Hartmann
 o = nos résultats

Fig: 13

Comparaison avec la littérature

Re'

100

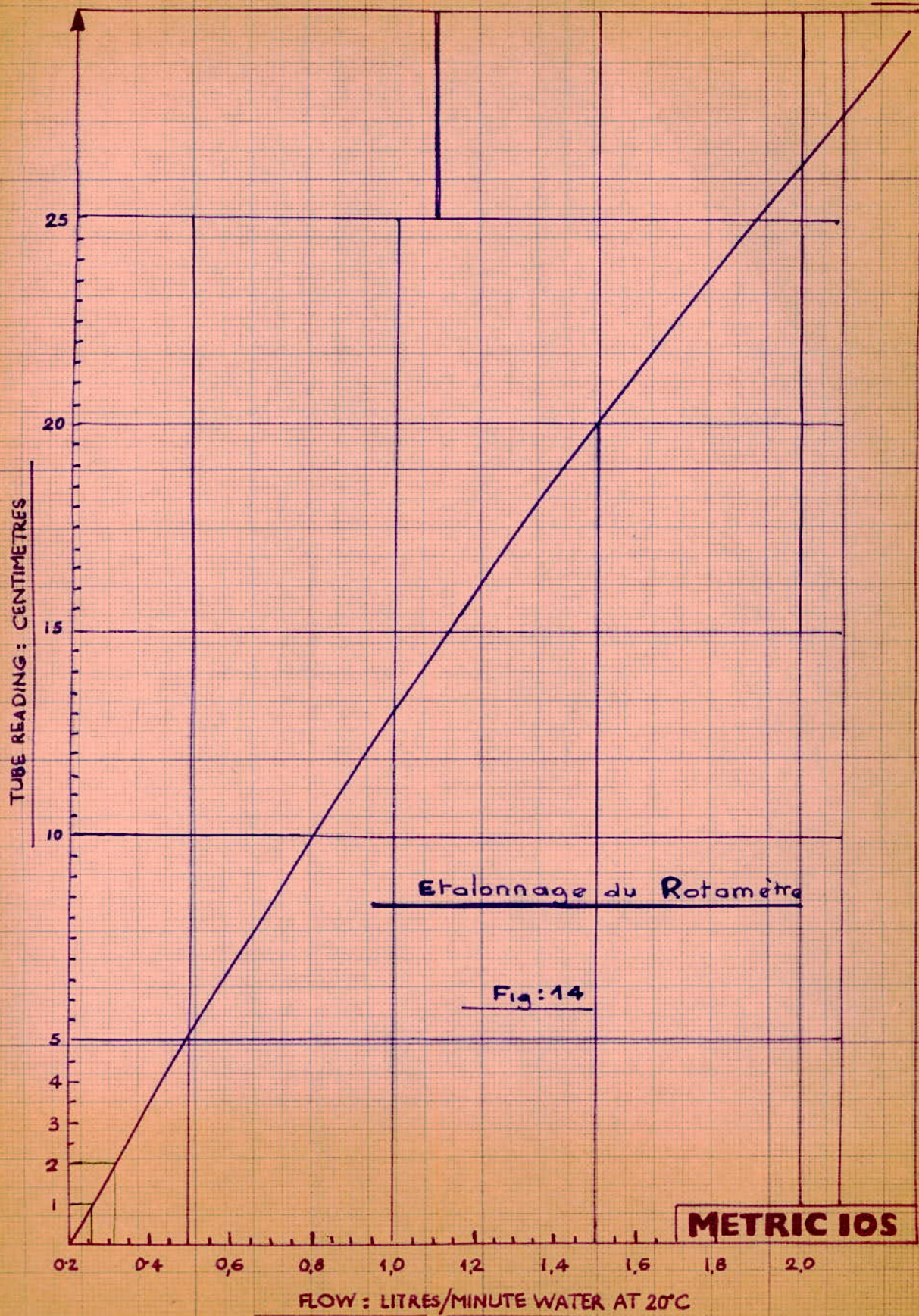
10

1

10

100

1000



Etalonnage du Rotamètre

Fig:14



Colonne
 hauteur: 180 cm
 ϕ : 5 "

Injection :
 ϕ_i : 0,1 cm

Garnissage :
 Billes de verre
 - 0,1 cm
 - 0,4 cm

Traceur :
 Solution NaCl 15%

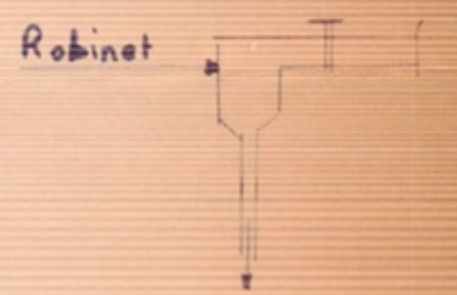
Fluide principal
 Eau de ville

Débits :
 de 0,48 à 3,5 l/mn

Electrodes
 en Cuivre.

SCHEMA
 GENERAL

Fig : 1



Bac