

(U.S.T.O)

INSTITUT DE GENIE MECANIQUE ET GENIE CIVIL

MEMOIRE PRESENTE AU DEPARTEMENT MECANIQUE
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MAGISTER

PAR

BENALI Larbi

INGENIEUR MECANICIEN

BEN/1082

TITRE

*ETUDE DE L'INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES
DES MATERIAUX SUR LA PERTE DE CHARGE
LINEAIRE DANS LES CONDUITES*

Soutenu le 12 Octobre 1983

PRESIDENT : M.M. BENZOHRA - U.S.T.ORAN

EXAMINATEURS : M.F. JIBAWI U.S.T.ORAN

W. PARZONKA U.S.T.ORAN

O. SCRIVENER I.M.F. STRASBOURG

D.P. LY I.M.F. TOULOUSE

(U.S.T.O)

INSTITUT DE GENIE MECANIQUE ET GENIE CIVIL

MEMOIRE PRESENTE AU DEPARTEMENT MECANIQUE
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MAGISTER

PAR

BENALI Larbi

INGENIEUR MECANICIEN



TITRE :

***ETUDE DE L'INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES
DES MATERIAUX SUR LA PERTE DE CHARGE
LINEAIRE DANS LES CONDUITES***

Soutenu le 12 Octobre 1983

PRESIDENT : M.M. BENZOHRA - U.S.T.ORAN

EXAMINATEURS : M.F. JIBAWI U.S.T.ORAN

W. PARZONKA U.S.T.ORAN

O. SCRIVENER I.M.F. STRASBOURG

D.P. LY I.M.F. TOULOUSE

AVANT - PROPOS

Avant d'entamer l'exposé de ce travail, que j'ai réalisé dans le cadre du mémoire de Magister, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, et m'ont facilité son achèvement.

Mes vifs remerciements à Monsieur JIBAOUI, Maître Assistant à l'USTO, pour l'aide et les conseils précieux qu'il m'a prodigués.

Ma reconnaissance à monsieur le Professeur PARZONKA pour sa participation dans mon travail et pour l'orientation de recherche qu'il m'a faite découvrir.

Ma gratitude à Monsieur le Maître de Recherche SCRIVENER pour m'avoir accepté en stage dans son laboratoire et pour l'aide considérable qu'il m'a apportée dans ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur le Maître de Recherche LY, qui a bien voulu faire partie de mon jury.

Comme, je remercie Monsieur BENZOHRRA, Maître de Conférence, pour m'avoir fait l'honneur, d'être le président de mon jury.



<u>AVANT- PROPOS</u>	I
<u>NOTATION</u>	IV
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I</u> Etude Bibliographique	3
1. <u>Classification des matériaux suivant leur comportement rhéologique</u>	4
1.1. Viscosité.....	4
1.2. Fluides newtoniens.....	6
1.3. Fluides non-newtoniens homogènes.....	6
1.4. Fluides non homogènes.....	9
2. <u>Classification des Viscosimètres</u>	12
3. <u>Perte de charge</u>	17
3.1. Paramètres influençant la perte de charge.....	17
3.2. Perte de charge dans les conduites lisses.....	19
3.3. Perte de charge dans les conduites rugueuses....	23
3.4. Cas particulier : réduction de frottement.....	26
4. <u>Méthodes de mesure</u>	30
4.1. Mesure de la pression.....	30
4.2. Mesure de la vitesse.....	32
4.3. Mesure du débit.....	35

1. Caractères Latins :

- A..... Aire de surface
- A.....Facteur de contrainte tangentielle
- C.....Concentration en gr/dl
- D.....Diamètre de la conduite
- d.....Diamètre du capillaire
- F.....Force
- f.....Facteur de frottement = $\lambda / 4$
- f.....Fréquence Doppler
- g.....Accélération de la pesanteur = 9.81 S.I
- GModule de rigidité
- GGradient de vitesse
- H.....Hauteur monométrique
- ΔHPerte de charge, ΔH_0 : cas de l'eau
- $\overline{\Delta H} = D.R$ Réduction de frottement = $(\Delta H - \Delta H_0) / \Delta H_0$
- k_sHauteur des aspérités rugueuses
- kConsistance du fluide dans la loi d'OSTWALD
- K.....Constante de BOLTZMANN
- ΔLPortion de longueur de la conduite
- L.....Longueur de la conduite
- L.....Longueur du capillaire
- L_e Parcours d'entrée
- L_m Parcours de mélange
- L_nLogarithme Népérien
- Log.....LOgarithme décimal
- M.....Masse moléculaire
- NRe.....Nombre de reynolds généralisé

- n.....Nombre structural du fluide
- P_m Pression mesurée
- P_sPression statique
- P.....Perte de charge exprimée en pression
- QDébit de la conduite
- R.....Rayon de la conduite
- ReNombre de Reynolds = $U_m \cdot D / \nu = U_m \cdot d / \nu$
- r.....Distance à l'axe de la conduite
- t.....temps d'écoulement
- T.....Température du fluide
- u.....Vitesse locale
- U_{max}Vitesse maximum dans la répartition de vitesse
- U_mVitesse moyenne de débit
- U^+Vitesse réduite = u / U_*
- U_*Vitesse de frottement = $(\tau_0 / \rho)^{1/2}$
- \bar{u}_yVitesse locale moyenne, longitudinale et transversale.
- V.....Vitesse en générale
- y.....Distance à la paroi
- y^+Distance réduite = $y U_* / \nu$

2. CARACTERES GRECS :

- δ Gradient de vitesse = $d u / dy$
- δ_0 Gradient de vitesse à la paroi
- δ Rapport des rayons du viscosimètre rotatif

τ	Contrainte tangentielle
τ_0	Contrainte à la paroi
τ_0	Seuil de contrainte
μ_0	Viscosité newtonienne
ν	Viscosité cinématique = μ / ρ
η	Viscosité au sens général
η_0	Viscosité de l'eau, ou du solvant en général
η_s	Viscosité de la solution
η_p	Viscosité plastique
η_{rel}	Viscosité relative
$[\eta]$	Viscosité intrinsèque
η_{sp}	Viscosité spécifique
η_{red}	Viscosité réduite
λ	Coefficient de perte de charge
λ_0	Coefficient de perte de charge, cas de l'eau
λ	Temps de relaxation
ρ	Masse volumique du fluide

- une partie expérimentale, concernant l'étude rhéologique de quelques fluides homogènes et de l'émulsion de "TASFALOUT" .

- une partie expérimentale, concernant l'étude de la perte de charge en capillaire des solutions de POLYOX 301, de l'émulsion de "TAS-ALOUT" et de l'émulsion de pétrole. Ainsi, qu'en conduite des solutions de POLYOX 301.

Le travail expérimental a été effectué, d'une part, à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran et d'autre part, à l'Institut de Mécanique des fluides de STRASBOURG.

Le stage, dans cet Institut, a permis d'augmenter la précision de mesure par rapport aux moyens techniques existant à l'USTO

Le but de ce travail étant:

-L'étude de l'influence de la viscosité des substances complexes (surtout des émulsions) sur les pertes de charges en conduite.

- L'étude des caractéristiques rhéologiques des fluides complexes sur l'exemple de l'émulsion de "TASFALOUT"

- L'étude de la réduction de frottement des solutions de polymères sur l'exemple des solutions de POLYOX 301.

CHAPITRE - I -

CHAPITRE I - TITRE I - BIBLIOGRAPHIQUE

1. CLASSIFICATION DES MATERIAUX SUIVANT LEUR COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE.

La rhéologie décrit la déformation des corps sous l'influence d'une contrainte. Dans ce contexte, les corps peuvent être des solides, des liquides ou des gaz. L'énergie de déformation, pour le cas des solides, est fonction de la déformation, alors que pour le cas des fluides, cette énergie est fonction de la vitesse de déformation. La déformation des solides parfaits est élastique. L'énergie de déformation est totalement retrouvée quand la contrainte est supprimée. Les fluides réels, parfaits, tels que les liquides et les gaz se déforment de façon irréversible et s'écoulent. L'énergie de déformation se dissipe dans le fluide, sous forme de chaleur qui ne peut être retrouvée par simple arrêt de la contrainte.

La majorité des corps que nous rencontrons, ne sont ni des solides parfaits, ni des fluides réels parfaits.

Suivant la relation contrainte-déformation, on divise les fluides en deux catégories: Les fluides newtoniens et les fluides non-newtoniens, dont le comportement rhéologique est caractérisé par la relation entre la viscosité du fluide le taux de cisaillement et dans certains cas le temps d'application de la contrainte.

1.1. VISCOSITE

La notion de viscosité est bien visualisée par l'expérience de COUETTE [4], qui décrit l'écoulement laminaire d'un liquide idéal entre deux longues plaques parallèles.

ISAAC Newton, fut le premier à établir la loi fondamentale de la viscosimétrie, qui lie la contrainte de cisaillement au gradient de vitesse. $\tau = \eta \dot{\gamma}$, on considère un écoulement laminaire d'un fluide idéal

Contrainte de cisaillement: $\tau = \frac{F \text{ (Force)}}{A \text{ (surface)}} \text{ , [N/m}^2\text{] [Pascal]}$

Gradient de vitesse: $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \text{ , [s}^{-1}\text{]}$

Viscosité: $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ , [Pa.s]}$

Dans un écoulement permanent, plusieurs définitions de la viscosité sont utilisées:

- viscosité dynamique ou viscosité de cisaillement : μ
- viscosité cinématique: $\nu = \mu / \rho$
- viscosité spécifique: $\eta_{sp} = (\eta - \eta_0) / \eta_0 = \eta_{rel} - 1$
- viscosité réduite: $\eta_{red.} = \eta_{sp} / C$
- viscosité intrinsèque : $[\eta] = \eta_{red}$ pour: $C \rightarrow 0$
- Viscosité apparente: $\eta = \tau / \dot{\gamma}$, qui se confond avec la viscosité d'un fluide newtonien.
- Viscosité différentielle: $\eta_{diff} = d\tau / d\dot{\gamma}$

La viscosité décrivant la propriété physique de résistance d'un liquide à l'écoulement de cisaillement dépend de cinq () paramètres indépendants: $\eta = f(S, T, P, G, t)$

>>S<<Ce paramètre désigne la nature physico-chimique de la substance, par exemple, si le liquide est de l'eau, de l'huile du miel ...

>>T<<Ce paramètre est lié à la température de la substance. La viscosité est très influencée par le changement de température la viscosité de certaines huiles minérales chute de 10% pour une augmentation de température de seulement 1°C.

>>P<< Ce paramètre „pression” n'est que peu étudié, l'augmentation de la pression provoque l'élévation de la viscosité.

Par exemple : l'augmentation de la pression de boues de forage de la pression ambiante à 1000 bars, élève la viscosité de près de 30%.

Ce paramètre a une importance considérable dans les problèmes de lubrification.

>>G<<Paramètre „gradient de vitesse” est le facteur décisif influençant la viscosité de très nombreux liquides.

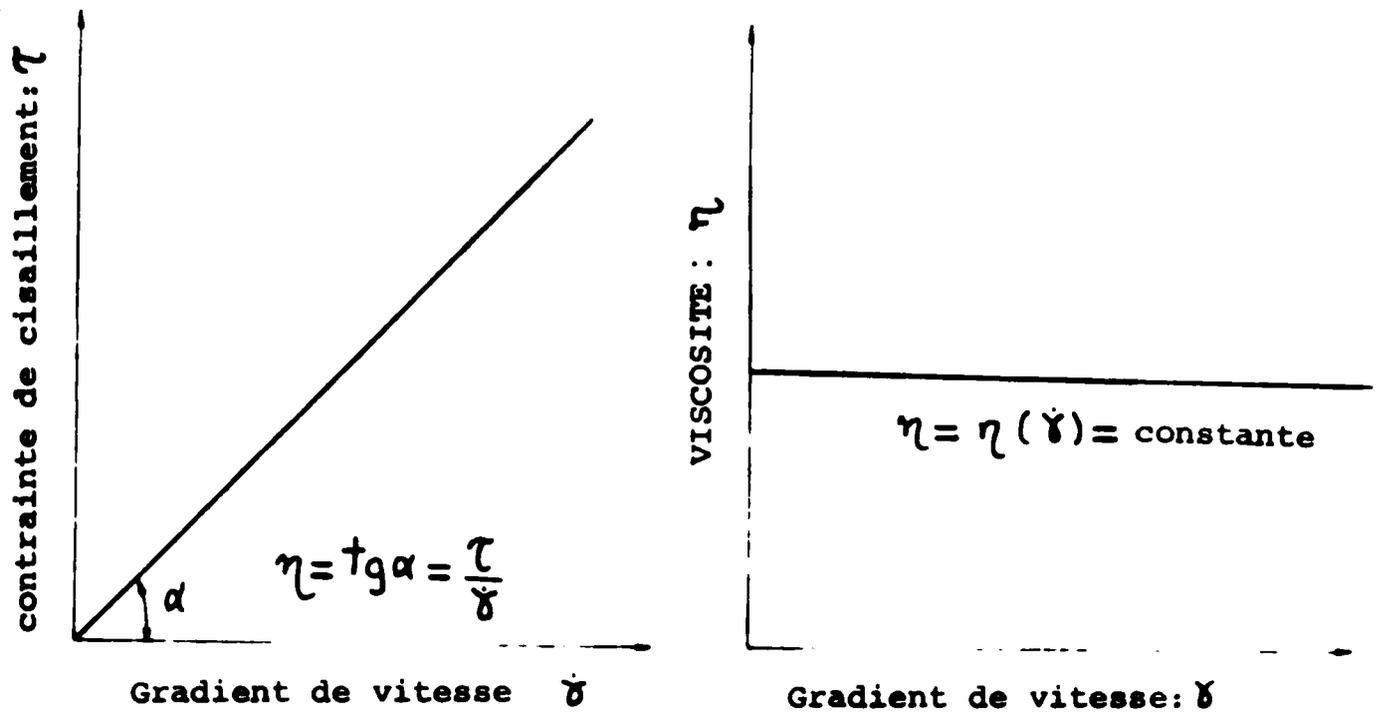
L'augmentation du gradient de vitesse provoque l'élévation ou la diminution de la viscosité des fluides non-newtoniens.

>>t<<Paramètre „temps” désigne le phénomène qui veut que la viscosité de certaines substances généralement des dispersions, dépende par exemple de la durée du temps, durant laquelle la substance sera soumise à un cisaillement constant ou sera maintenue au repos avant d'être testée.

1.2. Fluides Newtoniens

En écoulement Laminaire, un fluide est newtonien lorsqu'il est caractérisé par une viscosité qui ne dépend que de la matière, de la température et de la pression.

Le comportement rhéologie d'un fluide newtonien est proportionnel .



Exemples: eau, huile minérale, bilumes, etc....

1-3 FLUIDES NON-NEWTONIENS HOMOGENES.

Tous les fluides dont le comportement ne répond pas à la définition précédente sont dénommés: non-NEWTONIENS. Malgré, la grande diversité des comportement rhéologiques de ces fluides, on peut distinguer trois grandes catégories bien distinctes:

- a- Fluides non-newtoniens dont le comportement est indépendant du temps .
- b- Fluides non-newtoniens dont le comportement dépend du temps
- c- Fluides visco-élastiques.

a- FLUIDES NON-NEWTONIENS DONT LE COMPORTEMENT EST INDEPENDANT DU TEMPS.

Suivant la relation contrainte-déformation on peut diviser cette catégorie de fluides en trois types, dont les courbes rhéologiques sont caractérisées par deux ou plusieurs paramètres.

a-1 FLUIDES PLASTIQUES DE BINGHAM.

Ces fluides sont décrit par un modèle rhéologique avec deux paramètres constants:

b- Fluides non-newtoniens dont le comportement dépend du temps:

Cette catégorie de fluides peut aussi être divisée en deux types de fluides qui se distinguent par le fait, que soit la contrainte de cisaillement augmente ou diminue avec le temps, en maintenant un gradient de vitesse constant.

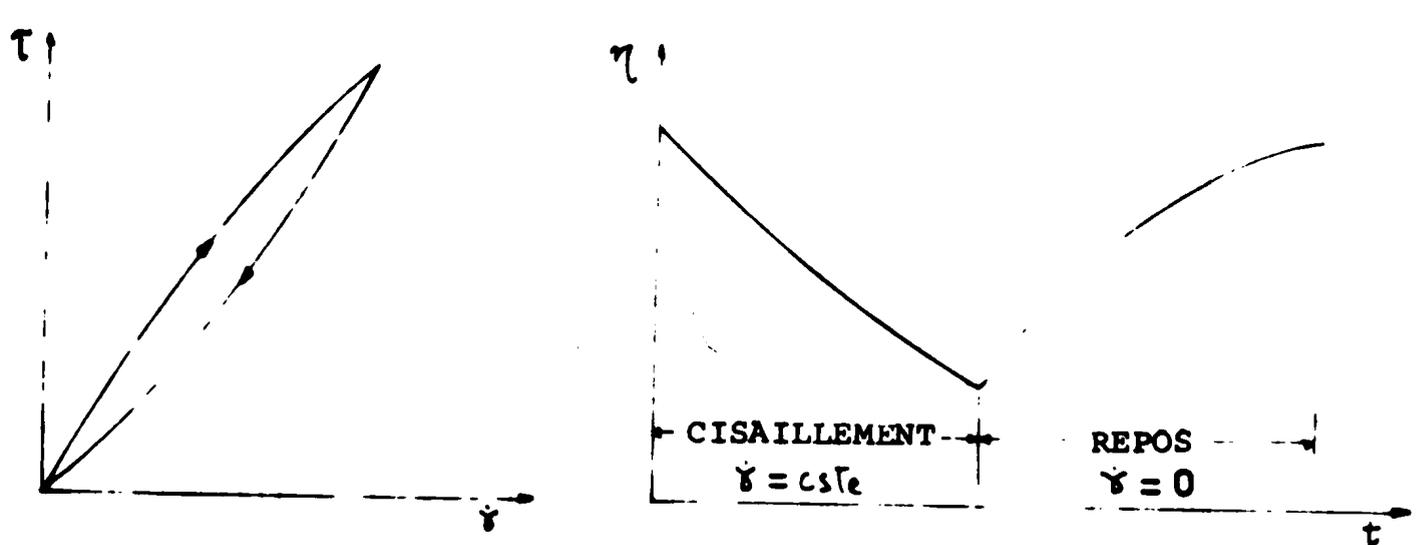
b-1. Fluides thixotropiques:

Un fluide est thixotropique, si pour un gradient de vitesse constant, sa viscosité apparente diminue avec le temps.

Quand la contrainte de cisaillement est supprimée, le fluide revient à sa consistance initiale.

On peut facilement les reconnaître, à partir de leur effet d'hystéresis, illustré dans les courbes d'écoulement.

Exemples: Suspension argileuse, boues épaisses.



b-2 Fluides rhéopectiques.

Un fluide est rhéopectique, si on lui applique une contrainte de cisaillement, il devient plus visqueux en fonction du temps pour un gradient de vitesse constant.

Exemple: suspension d'oléate d'ammonium.

C- Fluides visco-élastiques

Comme, leur nom l'indique, cette dernière catégorie de fluides possède à la fois des propriétés visqueuses et des propriétés élastiques; où on fait intervenir la loi de Newton et celle de Hooke.

Dans un écoulement permanent, le gradient de vitesse est τ/μ_0 , μ_0 : viscosité dans le sens newtonien on suppose, qu'on fait augmenter τ rapidement à $\tau + \delta\tau$, le fluide est maintenant cisailé avec un angle additionnel $\delta\tau/G$; G : module de rigidité.

La vitesse de cisaillement totale est maintenant:

$\dot{\gamma} = \tau/\mu_0 + \tau/G$ ou $\tau + \lambda\dot{\tau} = \mu_0\dot{\gamma}$, avec: $\lambda = \mu_0/G$ qui est la relation de maxwell et λ : temps de relaxation.

Exemple: Solutions de polymères.

Les solutions de polymères sont généralement caractérisées par leur viscosité visco-élastique et l'existence de contraintes normales.

Chaque polymère est caractérisé par sa viscosité intrinsèque qui est définie par la relation: $[\eta] = k M^b$ ainsi; sa viscosité cinématique est définie par la relation:

$$\eta = \eta_s [1 + k M C] \approx \eta_s [1 + [\eta] C]$$

Pour les solutions de polymères diluées de concentration inférieure à 100 PPM, on suppose que leur viscosité est indépendante du gradient de vitesse de cisaillement et que sa valeur pourrait être approximée à celle du solvant.

4- FLUIDES NON HOMOGENES:

On peut diviser les fluides non-homogènes en deux grandes catégories:

- Mixture ou suspension: solide-liquide
- Solution: liquide - liquide.

Dans cette étude, on se limite à cette dernière catégorie dénommée »EMULSION« (à l'exclusion des micro-émulsions) Une émulsion est un mélange de deux liquides non-miscibles, l'un est dispersé en forme de gouttelettes dans l'autre et stabilisé par un agent tensio-actif.

Le liquide qui contourne les gouttelettes est la phase externe ou phase continue. LES gouttelettes dispersées sont connues, comme phase interne ou phase dispersée.

Le plus souvent la phase continue, c'est le pétrole et la phase dispersée, c'est l'eau, pour une certaine concentration, on peut avoir une inversion de phases, c'est à dire, pétrole dans l'eau, en prenant certaines dispositions:

Il faudrait disposer relativement, d'une assez grande quantité d'eau, qui ne contient pas beaucoup de sel, pour augmenter la stabilité de l'émulsion et il faudrait que l'agent tensio-actif, soit préalablement contenu dans l'eau.

La connaissance de la viscosité des émulsions est un intérêt considérable. Jusqu'à nos jours, l'étude rhéologique n'a pas été suffisamment poussée pour établir des relations universelles liant la contrainte de cisaillement au gradient de la vitesse de cisaillement.

Certains travaux [7], ont pu vérifier que la viscosité des émulsions est fonction de plusieurs paramètres:

Concentration de la phase dispersée.

Tension ou vitesse de cisaillement.

Viscosité de la phase dispersée.

Nature du tensio-actif utilisé et sa concentration.

Taille des gouttelettes de l'émulsion.

Einstein [30], a obtenu une relation théorique valable pour les émulsions et les suspensions très diluées (on néglige l'influence entre les particules.)

$$\mu = \mu_0 (1 + 0.025C)$$

A cause de la déformation mutuelle des particules dispersées, TAYLOR a corrigé la relation d'Einstein

$$\mu = \mu_0 \left[1 + 0.025C \left(\frac{\mu_i + 2/5 \mu_0}{\mu_i + \mu_0} \right) \right]$$

Le rayon des gouttelettes ne peut excéder un certain rayon critique:

$$r = \sqrt{\frac{T}{(\rho_i - \rho)g}}$$

HATSCHEK [32], a dérivé l'expression de la viscosité, en utilisant une émulsion de paraffine dans 0,75% de solution de savon et a trouvé:

$$\mu = \mu_0 \left[\frac{1}{1 - \sqrt[3]{C}} \right]$$

SIBREE [31], a essayé de vérifier la relation de HATSCHEK, en utilisant une émulsion de paraffine-eau, avec 1% d'oléate de sodium ajouté au tensio-actif. Il a trouvé une bonne concordance avec l'expérience, en utilisant un facteur de correction h, qui d'après son opinion est de l'ordre de 1.3:

$$\mu = \mu_0 \left[\frac{1}{1 - \sqrt[3]{hC}} \right]$$

Assez récemment, RICHARDON [33] a déduit théoriquement l'équation: $\mu/\mu_0 = e^{kC}$; qui donne une bonne concordance avec l'expérience, pour une émulsion: benzène-eau, stabilisée avec l'oléate de Sodium.

D'autres travaux [9], ont pu montrer que la majorité des émulsions, sont non-newtoniennes et que généralement: La viscosité apparente décroît fortement, quand le gradient de vitesse augmente et qu'à vitesse de cisaillement constante la viscosité apparente de l'émulsion s'accroît rapidement avec la concentration de la phase dispersée.

μ : Viscosité de l'émulsion.

μ_0 : Viscosité du solvant ou de la phase continue.

μ_i : Viscosité de la phase interne

C : Concentration volumique (En pour cent).

T : Surface de contrainte de la phase dispersée.

ρ : Densité de la phase continue.

ρ_i : Densité de la phase dispersée.

h : Facteur de correction de SIBREE.

k : Constante.

2- CLASSIFICATION DES VISCOSIMETRES.

On peut classer les viscosimètres en trois catégories bien distinctes:

- Viscosimètres rotatifs
- Viscosimètres capillaires
- Viscosimètres à chute de bille

On peut aussi rencontrer les viscosimètres à orifice et les viscosimètres à disque tournant de BROOK FIELD

2.1. Viscosimètres rotatifs:

Le système à cylindres coaxiaux des viscosimètres rotatifs est inspiré du système des deux plaques parallèles de Newton.

On distingue deux systèmes:

2. 1.1 Systèmes seale ou à cylindre intérieur tournant:

Le cylindre intérieur ou »rotor« tourne à une vitesse définie. Le cylindre extérieur ou »godet« est immobile. On mesure le couple de réaction sur le cylindre intérieur .

La plupart des viscosimètres sont de ce type; la raison de cette tendance est que le contrôle de la température est plus réalisable, si le cylindre extérieur est immobile. Ces viscosimètres sont limités dans l'examen à de hautes vitesses de cisaillement des échantillons de faible viscosité, par l'apparition des tourbillons de TAYLOR qui perturbent l'écoulement et empêche toute mesure.

2. 1.2. Système couette ou à cylindre extérieur tournant:

Le cylindre extérieur tourne et par l'intermédiaire du fluide cisailé, transmet le couple de rotation au cylindre intérieur. On mesure le couple qu'il faut appliquer au cylindre intérieur pour le maintenir fixe .

On montre que la stabilité de l'écoulement est plus grande et se maintient pour les grandes vitesses de rotation, dans cette configuration.

Au même titre, que les systèmes coaxiaux, les dispositifs Plan-cône ont trouvé un assez vaste domaine d'application.

2-1-3- Critères de qualité:

Les qualités des mesures rhéologiques obtenues avec les viscosimètres rotatifs dépendent des paramètres suivants:

Pour les dispositifs à cylindres coaxiaux.

. Rapport des rayons:

Contrairement, au système des deux plaques parallèles de Newton, dans le système rotor et godet, la repartition de vitesse ne reste plus linéaire et de ce fait; on introduit une certaine erreur dans la mesure de viscosité, cette erreur est particulièrement importante dans l'examen des fluides non-newtoniens. Pour atténuer cette erreur, les normes Din et Internationales fixent la limite acceptable du rapport des rayons des deux cylindres:

$$1.00 \leq \delta = R_a/R_i \leq 1.01$$

- Effets des faces d'extrémités:

Les rotors, qui ont des faces d'extrémité font intervenir un couple supplémentaire, qui conduit à une erreur difficile à déterminer. En choisissant des cylindres coaxiaux à géométrie convenable, on peut minimiser ces effets

- Très petite largeur de fente ($\delta \approx 1.01$), avec la distance extrémité du rotor-godet 100 fois supérieure à la largeur de la fente.

- Systèmes de mesure à double fente ou rotor en forme de CLOCHE: les deux faces d'extrémité constituent chacune un mince anneau.

- Forme standard, où les faces d'extrémité sont évidées dans la face intérieure du rotor, l'air est piégé dans l'évidement et constitue un coussin d'air d'environ de 90 de la surface ou plus

- Forme MOONEY-EWART: Les faces d'extrémité sont de forme conique. L'angle entre les deux cônes est prévu de telle façon que la contrainte mesurée dans la fente conique, soit égale à la contrainte mesurée dans la fente cylindrique.

- Corps tournants et godets de mesure DIN: où toute les dimensions du système sont normalisées de telle sorte, que les erreurs dues à la non-linéarité du gradient de vitesse et aux effets d'extrémités sont maintenues constantes. Ceci, permet de diminuer la différence entre les résultats des essais.

pour minimiser l'erreur d'extrémité, on utilise aussi des anneaux de mercure qui tournent avec le rotor.

Pour Les dispositifs de mesure Plan-Cône » PK «.

Les meilleurs systèmes de mesure »PK«, ont des angles du cône inférieurs à 2 degrés. Le contrôle de la température est assez important pour les gradients de vitesse élevés .

2-1-4. Comparaison entre les dispositifs de mesure à Cylindres coaxiaux et les dispositifs Plan-Cône.

Théoriquement, les deux systèmes de mesure donnent des résultats identiques, pour les liquides homogènes newtoniens et non-newtoniens. Cependant il y a quelques différences dans leur application

- Il est plus facile de contrôler la température de l'échantillon dans le système à cylindres coaxiaux que dans le système »PK« .
 - Les systèmes plan-Cône , sont souvent choisis quand le nettoyage pose un problème
 - Le volume de l'échantillon dans le système »PK«, est moins important que celui nécessaire à la plupart des dispositifs coaxiaux.
 - Les systèmes »PK«, sont particulièrement utilisés pour l'examen des échantillons à gradients de vitesse élevés.
 - Les échantillons contenant des particules abrasives, sont une source d'usure, particulièrement pour la pointe du cône et le centre du plan.
 - Les systèmes »PK«, sont souvent utilisés pour la mesure des contraintes normales.
- Pour les deux systèmes la viscosité est donnée par la même équation :

$$\eta = \frac{G S}{n} \quad (\text{ m P a . S })$$

$$\text{avec: } G = \frac{A}{M} \times 100$$

n : vitesse du rotor [m n⁻¹].

A : Facteur de contrainte tangentielle.

S : Visualisation du signal.

M : Facteur de gradient de vitesse qui dépend des rayons dans les dispositifs coaxiaux.
ou constante spécifique à chaque dispositif plan-Cône.

2.2. Viscosimètres Capillaires.

On peut diviser les viscosimètres capillaires Principalement en deux types:

- Viscosimètres capillaires à pression variable.
- Viscosimètres capillaires par gravité.

On peut aussi rencontrer les viscosimètres à orifice qui sont moins utilisés et qui sont dérivés des viscosimètres capillaires.

2.2.1 Viscosimètres capillaires à pression variable.

On peut distinguer les viscosimètres capillaires absolues et les viscosimètres capillaires différentiels.

- Viscosimètres capillaires absolus.

Un piston, une extrudeuse ou toute autre source de pression pousse l'échantillon dans un capillaire, à un débit constant ou programmé en écoulement laminaire.

Le débit qui traverse le capillaire, provoque une chute de pression. La viscosité de l'échantillon testée est liée à la chute de pression et au débit (formule de POISEUILLE).

Mais; il y a toujours une correction apportée au problème de la longueur d'entrée et de sortie du capillaire.

L'avantage de ces viscosimètres est l'évacuation de la chaleur en continu par l'extrusion de l'échantillon.

Mais, ils ne peuvent être utilisés que pour l'examen des fluides dont le comportement est indépendant du TEMPS .

- Viscosimètres Capillaires différentiels:

On dispose de deux tubes capillaires identiques de longueurs différentes. On utilise l'action de deux piston qui font circuler le fluide à travers les deux capillaires et qui puissent assurer le même débit Ceci, provoque une différence de pression à l'entrée des deux capillaires.

Les effets des conditions d'entrée et de sortie sont complètement éliminés. Le diamètre du capillaire est de l'ordre de 2,1 mm à 0,5 mm, ce qui permet d'examiner des faibles quantités d'échantillons avec des gradients de vitesse assez élevés.

La viscosité est donnée par l'équation:

$$\eta = C \cdot \frac{\Delta P}{Q} \quad (\text{P a. S})$$

ΔP : Perte de pression

Q : débit traversant le capillaire .

C : Constante qui dépend uniquement des dimensions du capillaire.

2-2-2 Viscosimètre capillaires par gravité: (type : ubbelohde) .

La détermination de la viscosité repose sur la mesure du temps qui mettra une certaine quantité de liquide, soumise à son propre poids , pour s'écouler à travers une longueur donnée du capillaire . Ce dernier est de forme spécifique, ce qui permet de diminuer la longueur du déplacement du niveau, pour un temps suffisamment long.

La densité du liquide est un paramètre important . Ils sont d'excellents viscosimètres pour l'examen des liquides newtoniens de viscosité faible et moyenne . La viscosité cinématique est donné par l'équation:

$$\nu = C \Delta t , \quad [\text{mm}^2/\text{s}]$$

Δt : Période de temps d'écoulement.

C : Constante relative aux dimensions du capillaire

2-3. Viscosimètres à chute de bille:

Ce sont des viscosimètres simples et très précis qui sont utilisés dans l'industrie et la recherche pour l'examen des fluides transparents de viscosité relativement faible.

Un tube rempli du liquide à tester, est incliné de 10 degrés , Une bille de diamètre inférieur au diamètre du tube est prolongée dans le liquide et parcourt une certaine longueur pendant un temps défini, cette valeur est utilisée pour la mesure de la viscosité absolue [mpa.s] .

Ce type de viscosimètre est utilisé pour tous les fluides newtoniens.

Une modification de ces types de viscosimètres est les viscosimètres à traction de bille, qui sont utilisés pour la mesure de la viscosité des fluides newtoniens et opaques

3 - PERTE DE CHARGE:

3-1 PARAMETRE INFLUENÇANT LA PERTE DE CHARGE:

Dans un écoulement laminaire et permanent d'un fluide newtonien, dans une conduite cylindrique, La perte de charge par unité de longueur dépend des paramètres physiques suivants:

- Masse volumique du fluide : ρ [kg/m³]
- Vitesse moyenne d'écoulement : u [m/s]
- Diamètre de la conduite : D [m]
- Viscosité du fluide: γ [Pa.s]

En utilisant la théorie de l'analyse dimensionnelle (ou méthode des indices), on peut définir analytiquement la perte de charge.

On écrit que : $\Delta P / \Delta L = \rho^\alpha \cdot u_m^\beta \cdot D^\delta \cdot \gamma^\theta$

Les dimensions de $\Delta P / \Delta L$ sont L¹. M^m. T^t
Pour obtenir l'homogénéité des dimensions dans l'expression de la perte de charge; on écrit:

$$\begin{aligned} \alpha &= m - \theta \\ \beta &= -t - \theta \\ \delta &= 1 + 3m + t - \theta \end{aligned}$$

finalement, on aura : $\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho \cdot u_m^2 \cdot D^{-1} (\rho^{-\theta} u_m^{-\theta} D^{-\theta} \gamma^\theta)$

ou $\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho \cdot \frac{u_m^2}{D} \cdot f\left(\frac{\gamma}{\rho \cdot u_m \cdot D}\right)$

Si l'on pose : $\lambda = f\left(\frac{\gamma}{\rho \cdot u_m \cdot D}\right)$; cette fonction est sans dimensions et appelée: Coefficient de perte de charge linéaire, qui dépend uniquement du nombre de Reynolds : $Re = \frac{\rho \cdot u_m \cdot D}{\gamma}$

L'équation de perte de charge sera $\Delta P / \Delta L = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \frac{u_m^2}{D}$

En utilisant, l'expression de la contrainte de cisaillement à la paroi, obtenue à partir de l'écoulement de POISEUILLE

$\tau_0 = \frac{D}{4} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} = \gamma \cdot \frac{8 \cdot u_m}{D}$ avec $\frac{8 \cdot u_m}{D} = \delta$ gradient de vitesse

on obtient: $\lambda = 64 \cdot \frac{\gamma}{\rho \cdot u_m \cdot D} = \frac{64}{Re}$

Dans le cas d'un fluide non-newtonien, à loi de puissance, définis par le comportement rhéologique : $\tau = k \left(du/dy \right)^n$
 En écoulement laminaire, permanent,
 l'expression de la perte de charge est de la forme :

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho \cdot u_m^n \cdot D^n \cdot k \cdot n^q$$

Par le même raisonnement que précédemment, on obtient:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho \cdot \frac{u_m^2}{D} f_1 \left(\frac{u_m^{n-2}}{\rho D^n} \cdot k \right) \cdot f_2(n)$$

On peut écrire: $\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{1}{2} \lambda \frac{\rho u_m^2}{D}$ ou λ est une fonction de $\frac{u_m^{2-n} D^n}{K}$: nombre sans dimension et n : indice de puissance compte tenu de la contrainte de cisaillement à la paroi :

$$\tau_0 = \frac{D}{4} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} = K' \left(\frac{8 u_m}{D} \right)^n \quad \text{on obtient: } \lambda = \frac{8 K'}{\rho u_m^2} \left(\frac{8 u_m}{D} \right)^n$$

$$\text{ou } \lambda = 64 \cdot \frac{K' 8^{n-1}}{\rho \cdot D^n \cdot u_m^{2-n}}$$

Dans un esprit de généralisation METENER et REED [5] posent $64/N'Re$ et définissent le nombre de REYNOLDS généralisé :

$$N'Re = \frac{\rho D^n U_m^{2-n}}{K' 8^{n-1}} \quad \text{avec } K' = K \frac{3n+1}{4n}$$

$$NRe = \rho \frac{D^n U_m^{2-n}}{K} \frac{1}{8^{n-1} (3n+1)^n} \quad \text{Le nombre de REYNOLDS}$$

Généralisé, n'a pas de signification physique bien précise, mais représente un outil mathématique commode qui permet, d'obtenir en régime laminaire, une expression universelle de la forme: $\lambda = 64/NRe$, qui est valable simultanément pour les fluides à loi de puissance et pour les fluides newtoniens.

Pour $n=1$, on retrouve la loi bien connue de poiseuille:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

3-2 Perte de charge dans les conduites Lisses.

3-2-1 Résultats expérimentaux.

La recherche sur l'écoulement à travers les conduites a été très bien élaborée, du fait de son importance pratique.

Quand un fluide vient d'un grand récipient et entre dans une conduite, la distribution de vitesse dans la section, varie avec la longueur d'entrée, c'est pourquoi, on définit une longueur d'établissement qui correspond à l'établissement de la couche limite.

Cette longueur est de l'ordre de : $Le = 0.03D \cdot Re$ pour : $5 \cdot 10^3 < Re < 10^4$

D'après les expériences de H. KIRSTEN, pour l'écoulement turbulent, la longueur d'établissement est de l'ordre de 50 à 100 fois le diamètre. Mais, NIKURADSE a observé que la distribution de vitesse est uniforme à une distance bien inférieure à 50 et même 25 fois le diamètre.

- L'expression de la contrainte de cisaillement à la paroi est valable, aussi bien, pour l'écoulement turbulent que pour l'écoulement laminaire : $\tau_0 = 0,25 \frac{\Delta P}{\Delta L}$

Dans l'écoulement turbulent auquel, on se limite,

τ_0 est la somme des contraintes de cisaillement laminaires et turbulentes, elle peut être mesurée directement, en mesurant le gradient de pression.

- La relation entre le gradient de pression et le débit est bien déterminée théoriquement, pour l'écoulement laminaire, et elle s'accorde bien avec l'expérience. Pour l'écoulement turbulent cette relation est obtenue d'une manière empirique.

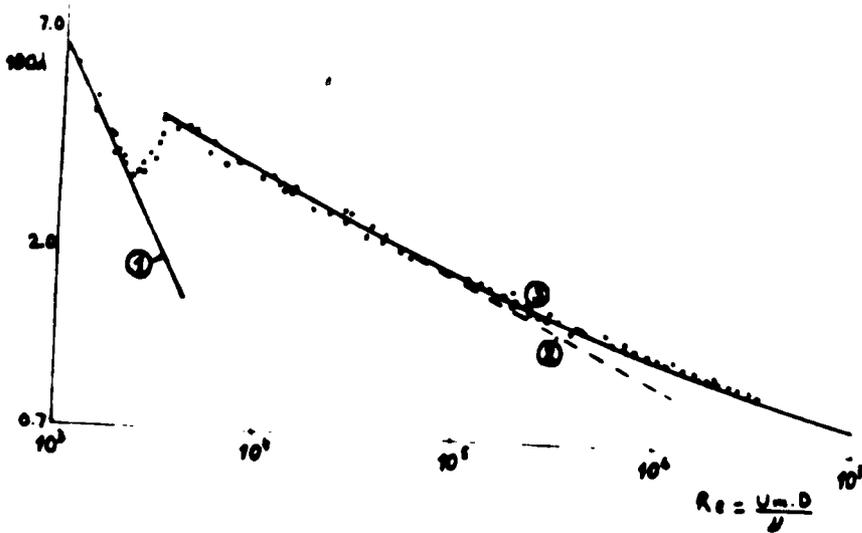
Elle est souvent donnée par la loi dite « loi de frottement VISQUEUX »

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\lambda}{D} \frac{\rho}{2} U_m^2 \quad \text{on obtient : } \tau_0 = \frac{1}{8} \lambda \cdot \rho U_m^2$$

En 1911. H. BLASIUS a établi l'équation empirique suivante:

$$\lambda = 0.3164 \left(\frac{U_m D}{\nu} \right)^{-1/4} = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

Cette formule n'est valable que pour les régimes : $Re < 10^5$
Dans cette zone $\Delta P = f(U_m^5)$
d'après les expériences, le coefficient de perte de charge linéaire, pour un tube lisse, n'est fonction, que du nombre de Reynolds.



Les courbes de la figure ci-dessus, représente la loi de frottement pour une conduite lisse:

- Courbe 1 : H. POISEUILLE $\rightarrow \lambda = 64/Re$; écoulement laminaire
- Courbe 2 : BLASIUS $\rightarrow \lambda = 0,3164/Re^{0.25}$ écoulement turbulent
- Courbe 3 : PRANDTL $\rightarrow \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \text{ Log } (Re\sqrt{\lambda}) - 0,8$ Ecoulement turbulent.

Il existe une zone de transition, où l'écoulement est tantôt perturbé, tantôt stable. Cette zone est limitée par un nombre de Reynolds de l'ordre de 2000, cette limite peut devenir considérablement grande pour les installations bien élaborées. Dans la figure ci-dessus, l'équation de BLASIUS, reproduit avec une grande précision les résultats expérimentaux pour $Re < 10^5$.

- J. NIKURADSE a entrepris une recherche expérimentale complète pour déterminer la loi de frottement et la distribution de vitesse dans les conduites lisses pour la gamme: $4 \cdot 10^3 < Re < 3.2 \cdot 10^6$. Il a établi l'équation empirique, sans dimension, de la distribution de vitesse:

$$\frac{u}{U_{max}} = \left(\frac{y}{R} \right)^{1/m}$$

m: constante qui varie légèrement avec le nombre de Reynolds. La représentation graphique de cette équation, montre que la supposition de la loi de puissance $1/m$, est en bon accord avec l'expérience.

$$m = 6 \text{ Pour } Re = 4 \cdot 10^3$$

$$m = 7 \text{ pour } Re = 100 \cdot 10^3$$

$$m = 10 \text{ pour } Re = 3240 \cdot 10^3 \text{ (le plus grand nombre de Reynolds atteint dans cette recherche)}$$

2.2 RELATION ENTRE LA LOI DE FROTTEMENT ET LA DISTRIBUTION DE VITESSE

L'équation de distribution de vitesse est liée à la loi de frottement, exprimée par la loi de BLASIUS. Cette relation a été établie en premier lieu par L. PRANDTL. En combinant l'équation de BLASIUS et l'expression de la contrainte de cisaillement; on obtient $\tau_0 = 0.0395 \rho U_m^{7/4} \nu^{1/4} D^{1/4}$

ou $\tau_0 = 0.03325 \rho U_m^{7/4} \nu^{1/4} R^{1/4} = \rho U_*^2$, Avec $U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$

vitesse de frottement.

En décomposant U_m^2 en $U_*^{7/2}$ et $U_*^{1/2}$ on obtient:

$$\left(\frac{U_m}{U_*}\right)^{7/2} = \frac{1}{0.03325} \left(\frac{U_* R}{\nu}\right)^{1/4} \quad \text{ou} \quad \frac{U_m}{U_*} = 6.99 \left(\frac{U_* R}{\nu}\right)^{1/7}$$

Pour $Re = 10^5$, ce qui correspond à $m = 7$, le rapport de la vitesse moyenne à la vitesse maximum est $U_m/U_{max} = 0.8$ donc

$U_{max}/U_* = 8.74 (U_* R/\nu)^{1/7}$, il est naturel de considérer que cette relation est valable pour n'importe quelle distance y à la paroi et non seulement pour l'axe ($y=R$).

$$u/U_* = 8.74 (y U_*/\nu)^{1/7} \quad \rightarrow \quad U_* = 150 u^{7/8} (\nu/y)^{1/8}$$

et $\tau_0 = \rho U_*^2 = 0.0225 \rho u^{7/4} (\nu/y)^{1/4}$ ou $\tau_0 = 0.025 \rho U_{max} (\nu/y)^{1/4}$

La loi générale entre la loi de frottement de BLASIUS et la puissance n de la loi de distribution de vitesse est:

$$\phi = C \eta^n, \quad \text{avec} \quad \phi = u/U_* \quad \text{et} \quad \eta = y U_*/\nu$$

3 LOI DE FROTTEMENT UNIVERSELLE A TRES GRAND NOMBRE DE REYNOLDS.

Une autre équation de distribution de vitesse, a été déduite par PRANDTL- VON KARMAN et a aboutit à la relation suivante: $(U_{max} - u)/U_* = 5.75 \text{Log} \frac{R}{y}$ qui est en bon accord avec l'expérience.

Si on intègre cette équation sur la section, on obtient la vitesse moyenne : $U_m = U_{max} - 3.75 U_*$ (2)

L'expérience de NIKURADSE a permis de réajuster la constante 3.75. Alors, l'expression de la vitesse moyenne devient :

$$U_m = 4.07 U_*$$

Avec la relation (1), on obtient: $\lambda = 8 \left(\frac{U_*}{U_m}\right)^2$

La théorie de la longueur de mélange de PRANDTL, permet de déduire la loi universelle de distribution de vitesse pour les très grands nombres de Reynolds:

$$\phi = 2.5 \text{Ln} \eta + 5.5 ; \quad \text{ou} \quad \phi = 5.75 \text{Log} \eta + 5.5 \quad (3)$$

Combinant les équations (2) et (3), on obtient :

$$U_m = U_r (2.5 \text{ Ln } R U_r / \nu + 1.75) \quad (4)$$

On peut introduire le nombre de Reynolds :

$$\frac{R U_r}{\nu} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_m D}{\nu} \cdot \frac{U_r}{U_m} = \frac{U_m D}{\nu} \cdot \frac{\sqrt{\lambda}}{4\sqrt{2}}$$

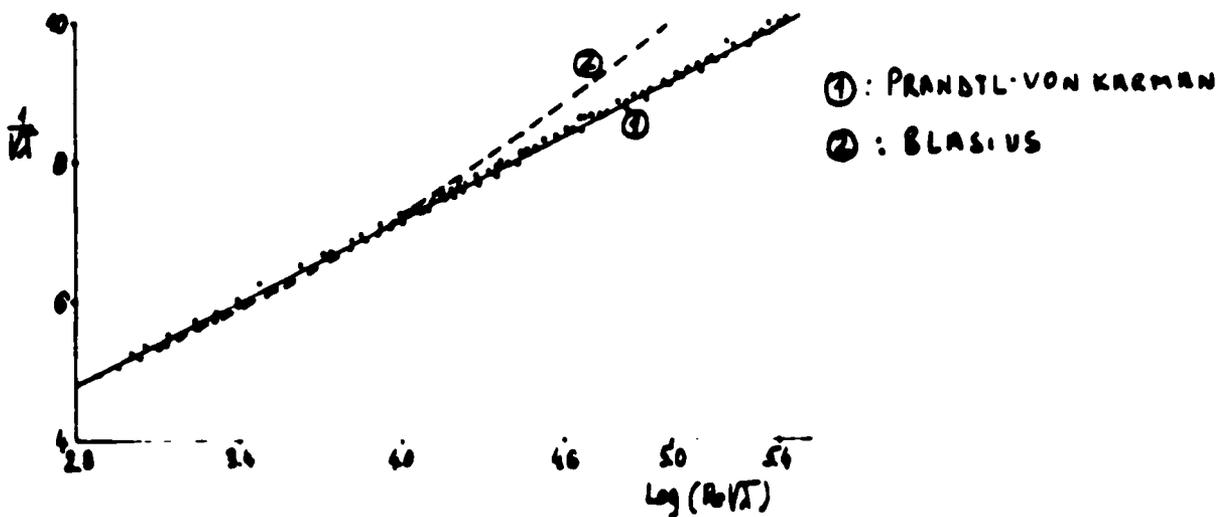
En utilisant les équations (2) et (4) ; on obtient :

$$\lambda = \frac{8}{[2.5 \text{ Ln}(Re\sqrt{\lambda}) - 2.5 \text{ Ln } 4\sqrt{2} + 1.75]^2} = \frac{1}{[2.035 \text{ Log}(Re\sqrt{\lambda}) - 0.91]^2}$$

ou: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.035 \text{ Log}(Re\sqrt{\lambda}) - 0.91 \quad (5)$

L'expression ci-dessus, montrée par la loi de frottement universelle pour les conduites lisses est une droite, si on représente

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = f(\text{Log } Re\sqrt{\lambda})$$



Les coefficients numériques de la courbe ① diffèrent très sensiblement de ceux obtenus dans l'expression (5). La courbe peut être représentée par l'équation $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \text{ log}(Re\sqrt{\lambda}) - 0.8$ l'équation de PRANDTL est vérifiée par les expériences de NIKURADSE pour: $Re > 3.410^6$.

L'équation de BLASIUS dévie progressivement des mesures expérimentales pour les valeurs élevées de $Re\sqrt{\lambda}$.

L'utilisation du nombre de Reynolds généralisé, aboutit à la loi de perte de charge des fluides à loi de puissance par une courbe identique à celle des fluides newtoniens.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A \text{ Log}(N' Re\sqrt{\lambda}^{2-n}) + B, \text{ avec } N' Re = \frac{U_m^{2-n} D^n \rho}{K}$$

Les coefficients A et B dépendent de n et sont déterminés expérimentalement.

3-3 Perte de charge dans les conduites rugueuses:

La plupart des conduites industrielles ne peuvent être considérées comme hydrauliquement lisses, surtout pour les nombres de Reynolds assez grands.

La nécessité de maîtriser les lois de frottement dans les conduites rugueuses est limitée par le nombre extrêmement grand de paramètres qui décrivent la rugosité, du fait de la grande diversité des formes géométriques.

L. HOPF, trouva récemment deux types de rugosité qui sont liés aux lois de frottement dans les conduites rugueuses.

La première forme de rugosité provoque des frottements qui sont proportionnels au carré de la vitesse, ce qui signifie que le coefficient de frottement est indépendant du nombre de Reynolds et ne dépend que de la grosseur relative et de l'espacement des éléments rugueux.

K. FROMM et FRITSCH, trouvèrent que pour des rugosités géométriquement semblables: $\lambda = f \left[\left(\frac{k_s}{R} \right)^{0.314} \right]$

Le second type de formule s'impose quand les saillies, sont assez douces, ou quand un petit nombre d'elles est réparti sur une surface relativement grande (bois, conduites commerciales en acier):

$$\lambda = f \left(Re, \frac{k_s}{R} \right)$$

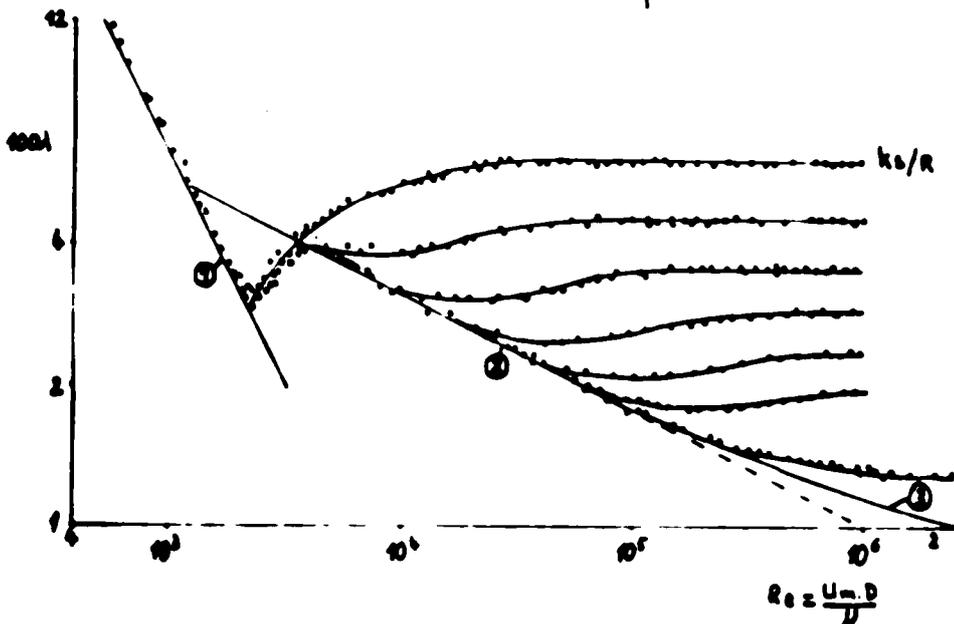


Figure ci-dessus représente les résultats expérimentaux de la loi de frottement dans les conduites rugueuses, d'après NIKURADSE. la rugosité est artificielle et réalisée avec des grains de sable

3.3.1 Formule du frottement

- Régime hydrauliquement lisse.

$$0 \ll k_s U_* / \nu \ll 5 \longrightarrow \lambda = f(Re)$$

On considère que l'écoulement est hydrauliquement lisse, si toutes les aspérités sont contenues dans la sous-couche visqueuse.

- Régime transitoire.

$$5 \ll k_s U_* / \nu \ll 70 \longrightarrow \lambda = f(k_s/R, Re)$$

Une partie de la hauteur des aspérités dépasse la sous-couche visqueuse. Les frottements additionnels, comparés avec la conduite lisse, sont dûs à la force de traînée provoquée par les aspérités dans la couche près de la paroi.

- Régime complètement rugueux.

$$k_s U_* / \nu > 70 \longrightarrow \lambda = f(k_s/R)$$

Toutes les aspérités dépassent la hauteur de la sous-couche visqueuse et la plus grande partie des frottement est due à la force de traînée qui les sollicite. Pour cette raison, la loi de frottement prend une forme quadratique.

3.3.2 Distribution de vitesse

on obtient la même forme de distribution de vitesse que pour les conduites lisses $u/U_{max} = f(y/R)$
 Cette équation reste valable pour les conduites rugueuses, seule la constante d'intégration est modifiée: $y_0 = \delta k_s$,

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\chi} (\ln y/k_s - \ln \delta)$$

δ Constante qui dépend de la nature de rugosité
 χ constante de la longueur de mélange de PRANDTL égale à 0,4 près de la paroi

Comparée avec les mesures de NIKURADSE, la distribution de vitesse pourrait être représentée par : $u/U_* = 2,5 \ln y/k_s + B$
 Pour le régime complètement rugueux $B = 8,5$

$$u/U_* = 5,75 \text{ Log } y/k_s + 8,5 \quad (5)$$

Pour le régime hydrauliquement lisse : $B = 5,5 + 2,5 \ln U_* k_s / \nu$
 Sur l'axe de la conduite ; on aura :

$$\frac{U_{max} - u}{U_*} = 2,5 \ln \frac{R}{y} = 5,75 \text{ Log } \frac{R}{y}$$

Equation approchée de distribution de vitesse.

3.3.3 Relation entre la loi de frottement et la distribution de vitesse.

Cette relation pourrait être déduite de la même manière que pour les conduites lisses.

Elle est plus simple pour le régime hydrauliquement rugueux: $U_m = U_{max} - 3.75 U_*$,

avec l'équation (5). On aura: $U_{max} = U_* (2.5 \text{ Ln } R/k_s + 8.5)$

$$U_m/U_* = 2.5 \text{ Ln } R/k_s + 4.75 \text{ ou } \lambda/8 = U_*^2/U_m^2 = (2.5 \text{ Ln } R/k_s + 4.75)^{-2}$$

on obtient une bonne concordance avec les résultats de NIKURADSE, si la constante 1,68 est remplacée par 1,74.

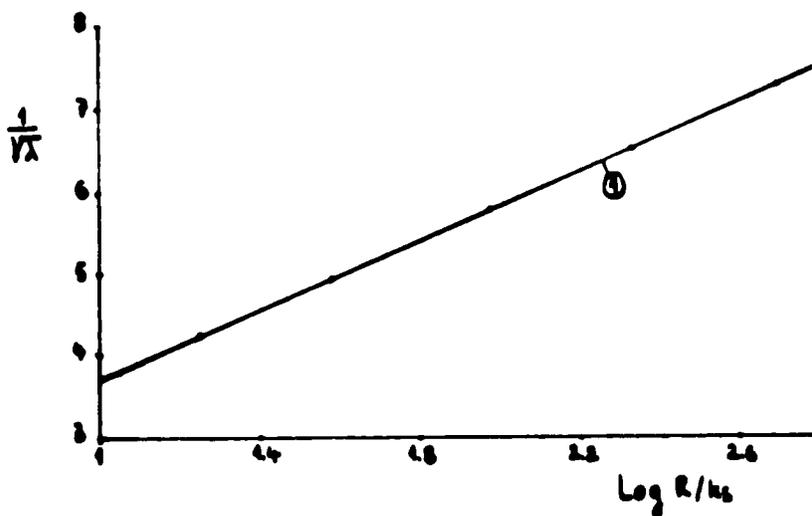
Ce qui nous donne la formule de frottement pour le régime complètement rugueux:

$$\lambda = \frac{1}{(2 \text{ Log } R/k_s - 1.74)^2} \quad (6)$$

La loi universelle de frottement pour le régime transitoire de l'écoulement hydrauliquement lisse au complètement rugueux a été établie par COLEBROOK et WHITE [24]

$$1/\sqrt{\lambda} = 1.74 - 2 \text{ Log } k_s/R + 18.7/Re\sqrt{\lambda}$$

La formule de frottement, pour les conduites à rugosité réalisée avec du sable, dans le régime complètement rugueux est en bon accord avec l'expérience (figure ci-dessous)



Courbe (1) d'après l'équation (6)

3-4 Cas particulier: Réduction de frottement .

Contrairement, à tous les fluides newtoniens qui sont régies par la loi universelle de frottement (PRANDTL-VON-KARMAN, en régime turbulent). Certains fluides non newtoniens qui sont des solutions de macromolécules (polymères) et de solvant, modifient les écoulement et provoquent une réduction de frottement . Ce phénomène a été mis en évidence par les travaux expérimentaux de divers auteurs et notamment ceux de TOMS [35] en 1948.

On dit, qu'il ya réduction de frottement pour un écoulement dans une conduite quand la perte de charge d'une solution ou d'une suspension est réduite à une valeur ΔH inférieure à la perte de charge ΔH_0 que l'on obtient, si le solvant était seul en écoulement, pour un débit constant.

On définit alors :

-Perte de charge relative : $\frac{\Delta H}{\Delta H_0}$

-Pourcentage de réduction de frottement : D.R = $\frac{\Delta H_0 - \Delta H}{\Delta H_0}$

Les travaux expérimentaux sur les pertes de charge avec les solutions de polymères, ont mis en évidence l'existence de deux régimes différents dans la représentation du facteur de perte de charge en fonction du nombre de Reynolds (Panche.I.).

a-Dans le premier régime, avec l'utilisation de certains types de polymères, en particulier : Les polyélectrolytes (CMC), le régime transitoire n'apparaît pas, la courbe se présente presque comme un prolongement du régime laminaire.

b-Dans la deuxième régime, pour une grande partie de solution de polymères, on distingue plusieurs zones :

b-1 Pour l'écoulement laminaire (courbe.L.), les solutions de polymères diluées ne réduisent pas les frottement, elles obéissent à la loi de POISEUILLE : $f = 16/Re$. Leur viscosité est approximée à la viscosité du solvant ; alors que pour les solutions les plus concentrées, on suppose que leur comportement rhéologique est à la loi de puissance et de ce fait, leur viscosité est : $\eta = K.\dot{\gamma}^n$, de même, on introduit le nombre de Reynolds généralisé.

b-2 Le régime transitoire (courbe-T-), est en général retardé par la présence de polymères.

b-3 Une zone turbulent (coube N.), sans réduction de frottement dans laquelle, la relation du facteur de frottement avec le nombre de Reynolds est la même que pour un écoulement d'un fluide newtonien et obeissant à la loi de PRANDTL - VON KARMAN.
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \text{ Log } Re\sqrt{f} - 0.4$$

b.4 Un régime polymérique (courbe.P.), avec réduction de frottement à partir d'un point seuil ou point d'onset (point O), situé sur la courbe de PRANDTL-VON-KRMAN. Dans cette zone, la relation entre le facteur de frottement et le nombre de Reynolds, suit la loi d'après VIRK [13]

$$1/\sqrt{f} = (4 + S) \text{ Log } Re\sqrt{f} - 0.4 \text{ Log } \sqrt{2} D \omega^*$$

S, ω^* : paramètres qui dépendent de la modécule de polymère.

S : pente de la droite dans la représentation de \sqrt{f} en fonction de $Re \cdot \sqrt{f}$.

b-5: un régime asymptotique (courbe-M-), qui correspond au maximum de réduction, est définis par l'asymptôte de VIRK qui est unique et indépendante de la nature du polymère. Elle est décrite par la relation:
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 10 \text{ Ln } Re\sqrt{f} - 32.4$$

b-6: Un dernier régime (courbe.D.), où la réduction de frottement diminue. Ce régime correspond à la dégradation du polymère

Certains auteurs ont essayé de donner une explication du phénomène de réduction de frottement. VIRK a conclu récemment que:

- L'interaction polymère-turbulence, qui est responsable de la réduction de frottement, elle se passe au voisinage de la distance sans dimension à la paroi: $Y^* = Y U_* / \nu$ de l'ordre de 15, au niveau du pic de production turbulente, suggérant que les molécules de polymères interfèrent avec le processus de l'écoulement .

- L'élongation macromoléculaire est impliquée dans le mécanisme de réduction de frottement.
- Le polymère semble retarder également le transport de masse en diffusion turbulente.
- Il est aussi possible que la réduction de frottement observée, soit une conséquence d'une modification de l'équilibre des transferts énergétiques.

Plusieurs types de mécanismes de réduction, sont proposés en utilisant des écoulements relativement simples et bien définis, qui modélisent de façon précise, les types de mouvement qui semblent associer au phénomène de la turbulence établie.

- Théorie impliquant des modifications de cisaillement à la paroi .
- Théorie impliquant un écoulement élongationnel, d'où l'on introduit une viscosité élongationnelle qui est de 100 à 1000 fois plus importante que la viscosité du solvant.

Certaines recherches expérimentales, ont montré l'importance de certains paramètres sur la réduction de frottement: Structure de la molécule, sa flexibilité, la longueur de la chaîne et la qualité du solvant .

Certains auteurs, ont admis que les matériaux en suspension dans l'eau peuvent être réducteurs de frottement, parmi ceux cités par IAN RADIN , on note:

- BLATCH (1906) pour du sable .
- MAUDE et whitemore (1958) pour la poudre d'émeri.
- THOMAS (1962) et EIN-SENBERG (1964) pour du minerai (THORIA)
- ZANDI (1967) pour la houille grasse, du charbon de bois, des escarbilles et de l'argile à faible concentration.
- PIRIH et SWANSON (1972) pour des particules en forme de fibre d'élasticité et de grosseur inférieure à un micron:
à des concentrations en poids inférieures à 0.5%, ont obtenue une réduction de frottement de l'ordre de 50%.
- KEREKES et DOUGLAS (1972) pour des fibres de nylon dans l'eau
METZNER a constaté que la combinaison de solution de polymères aux suspensions de fibres, améliore beaucoup la réduction de frottement qui peut atteindre 70%.

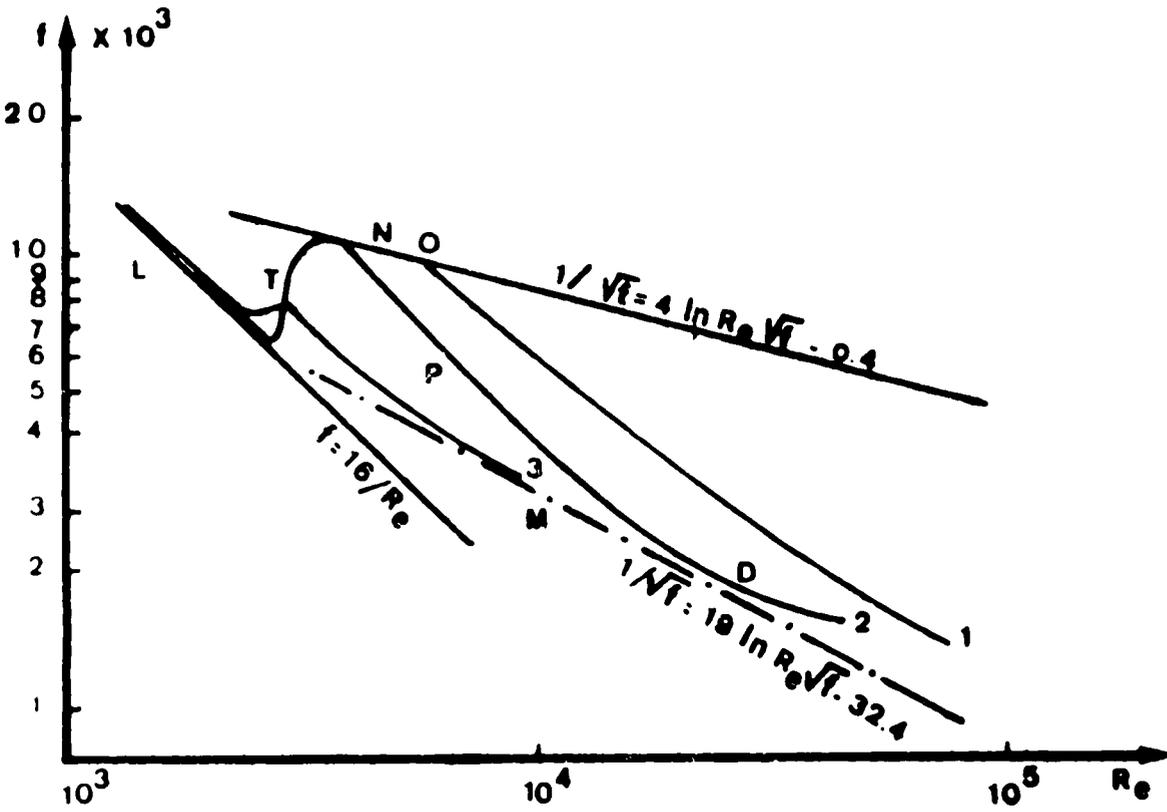


PLANCHE -I- : Réduction de frottement par addition de solutions de polymères.

4- METHODES DE MESURE:

4-1- Mesure de Pression:

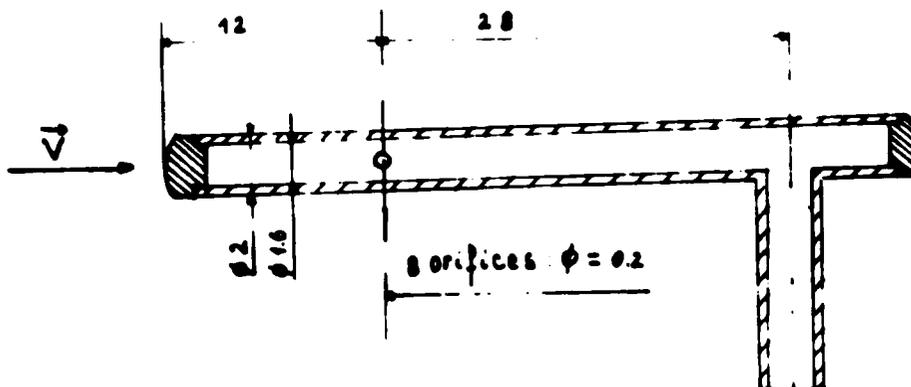
Dans les écoulements en conduites, on mesure la pression statique à la paroi, on considère que sa valeur est constante sur toute la section. Les mesures précises de la pression statique sont influencées par plusieurs paramètres:

- Influence des caractéristiques géométriques de l'appareil de mesure.
- Perturbations de l'écoulement, causées par la présence d'une singularité (bavure, chanfrein, etc...)
- Géométrie de la prise de pression: le trou doit être de petite dimension, son axe doit être perpendiculaire à la paroi, son diamètre doit être de l'ordre de l'épaisseur de la couche laminaire (condition irréalisable !) et sa profondeur égale au moins à deux fois le diamètre [16] .

0- Sondes de pression statique:

Les sondes de pression statique ou sonde de PRANDTL, servent à mesurer la répartition des pressions dans toute la section, à condition que la vitesse moyenne soit bien définie en chaque point. La pression de mesure est influencée par :

- Les caractéristiques géométriques de l'orifice de la prise de pression .
- L'étrave et le support de la sonde.
- L'influence de la turbulence.



Si on néglige l'échelle de turbulence par rapport aux dimensions de la sonde, la pression mesurée est liée à la pression statique réel pour la relation suivante:

$$P_m = P_s + K \cdot \rho (U^2 + V^2)$$

K: Coefficient qui dépend des dimensions relatives de sonde, des petits tourbillons et de l'échelle de turbulence.

L'influence de l'inclinaison de la sonde par rapport à la direction de l'écoulement déterminée expérimentalement pour chaque sonde : $(P_0 - P_s) / 0.5 \rho U_m^2 = K \sin^2 \theta$

K: Coefficient qui dépend du nombre de Reynolds, du diamètre des orifices et de la réalisation mécanique des sondes.

b- Manomètres de Pression:

Les manomètres les plus utilisés pour la mesure de pression des gaz et liquides, sont les manomètres de BOURDON, les capteurs de pression, ou différents types de capsules manométriques qui utilisent une transmission mécanique plus au moins complexe.

L'emploi des tubes de BOURDON et des capsules manométriques est limité par le fait, qu'ils ne peuvent être utilisés en général pour les fluides corrosifs et que la pression ne doit pas varier rapidement. Dans ce cas, l'emploi des capteurs s'avèrent nécessaire. Les capteurs qui permettent de mesurer les fluctuations de pression, sont munis d'une membrane qui se déplace, sous l'action de la pression du fluide et provoque, soit:

- La variation de la résistance d'un potentiomètre.
- La variation d'une induction magnétique
- La variation de la résistance de jauges collées sur une membrane
- La variation de la capacité entre deux plaques.
- La variation de la charge électrique aux bornes d'un piézoélectrique ou de piézotransistors.

Pour étalonner les capteurs, on utilise les manomètres à eau ou à mercure pour les faibles pressions et la balance manométrique pour les grandes pressions.

c- Manomètres Constitués par un tube en » U «

Ce sont les manomètres les plus simples pour la mesure de faibles pressions différentielles. Le tube en » U « peut être vertical, on incliné pour augmenter la sensibilité de la mesure, on inverse dans le cas des liquides.

- Le micromanomètre FORTIER est un micromanomètre différentiel à liquide, le repérage du niveau s'effectue, en observant à l'aide d'un viseur le ménisque éclairé par une source diffusante peu étendue. La mesure de la dénivellation, peut être faite à l'aide d'une règle graduée ou d'un vernier. Un maximum de précision, de l'ordre de 1/100 de mm, est obtenue par une visée au calléométrie.

4-2 . MESURE DE VITESSE:

a- TUBE DE PITOT:

Le tube de pitot permet la détermination de la vitesse locale, grâce à la mesure d'une différence de pression:

$$U = K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}$$

K: Coefficient d'énergie cinétique. (coefficient de correction)

La pression de mesure est influencée par les paramètres suivants:

- Influence du désalignement du tube par rapport à la direction de l'écoulement (désalignement de 20° → erreur de 0,5%)
- Interférence mutuelle entre la sonde et la paroi, lorsque les dimensions de la sonde sont comparables à la distance qui la sépare de la paroi.
- Ecoulement turbulent, on a de plus l'influence des fluctuations de la vitesse en module et en direction.

b) ANEMOMETRE A FIL CHAUD:

L'anémomètre à fil chaud est un moyen puissant pour la mesure de la vitesse; (en écoulement turbulent)

On assure le passage d'un courant constant (température du fil constante) et on assure la différence de potentiel aux bornes du fil (le refroidissement du fil entraîne une variation de sa résistance qui est proportionnelle à la vitesse d'écoulement). On devra effectuer un étalonnage qui est préalablement difficile.

L'élément sensible est un fil métallique très fin de 0.5 à 5 μC de diamètre, en platine rhodié ou en tungstène pour les mesures dans les gaz; ou un film métallique très mince de 0.1 μC environ, en nickel ou en platine déposé sur un support en quartz et recouvert d'une couche isolante pour les mesures dans les liquides. De nombreuses sondes dérivent du fil chaud:

- Deux fils disposés en forme de dièdre, permettent de mesurer les composantes transversales de vitesse; ainsi que les tensions de Reynolds.
- Deux fils croisés permettent de mesurer deux composantes de vitesse, la détermination des fluctuations de température nécessite un troisième fil.

Dans chaque cas un étalonnage fréquent est nécessaire; en tenant compte de la température du fluide et en négligeant l'énergie transmise par rayonnement.

La précision de mesure dépend de plusieurs facteurs:

- Lorsque les fluctuations de vitesse ou de température sont importantes; deux causes de non-linéarité apparaissent: non-linéarité des lois d'échange et inertie thermique du fil.

Les erreurs peuvent être de l'ordre de 1 à 2%.

- Effet parasites: perturbation aérodynamique, vibration, influence de la température et de la pression.

Beaucoup de chercheurs, ont établi expérimentalement la relation du coefficient d'échange.

$$\frac{h d}{\lambda} = f (Re, M, Kn, \frac{T_w}{T_a}, Gr, Pr)$$

h: Coefficient d'échange ; Re : nombre de Reynolds

λ : Conductivité thermique ; M : nombre de Mach

d : Diamètre du fil ; Kn ≅ $\frac{M}{Re}$: nombre de KNUDSEN

Pr: Nombre de PRANDTL

nombre de GRASHOF. $Gr = g \rho^3 \frac{(T_w - T_a) d^3}{\gamma T}$

T_w : Température du fil ; T_a : température d'arrêt.

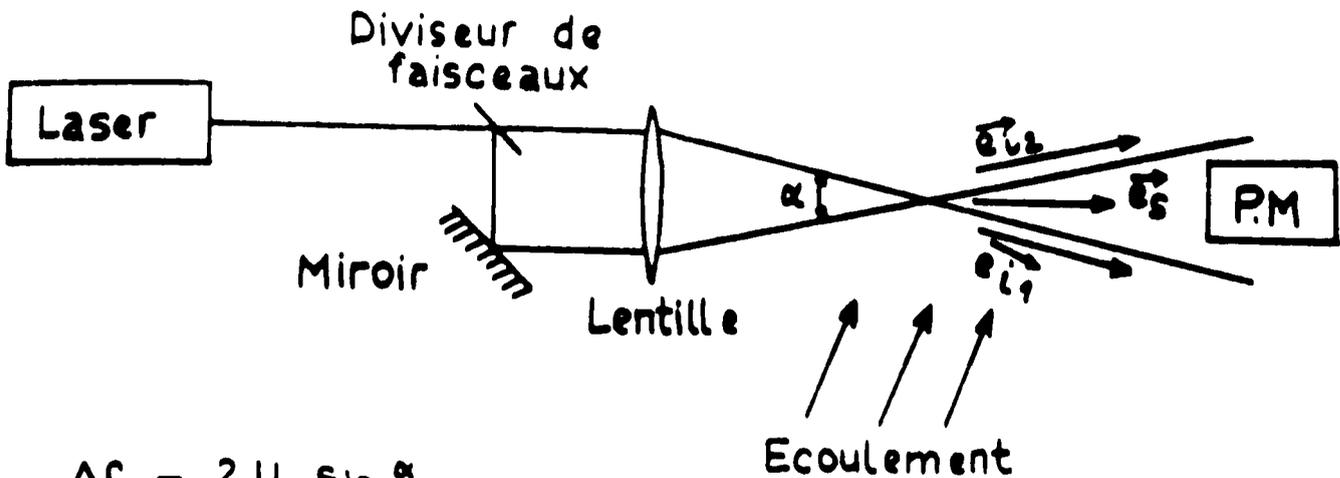
c- ANEMOMETRE LASER

Cette méthode de mesure de vitesse qui est assez récente (1968) présente l'avantage de permettre la mesure de la vitesse ponctuelle, sans perturbation de l'écoulement, mais elle est limitée aux fluides transparents ou de faible épaisseur, et elle ne permet pas la mesure de la vitesse instantanée .

Le principe met en oeuvre l'effet DOPPLER qui affecte la lumière diffusée par une particule en suspension dans le fluide en mouvement . Cet effet se traduit par une différence entre la fréquence de l'onde diffusée et la fréquence de l'onde incidente » déplacement DOPPLER « .

Ils est nécessaire d'ensemencer l'écoulement à l'aide de très petites particules en faible quantité.

Dans l'air, on utilise des particules qui ne sont pas toxiques de 1 à 10 microns. Dans l'eau, on utilise du polystyrène de 0.5 microns avec une concentration de 1/50.000 etc



$$\Delta f_s = \frac{2U}{\lambda_0} \sin \frac{\alpha}{2}$$

λ_0 : Longueur d'onde de la lumière incidente .

U : Projection de la vitesse sur la bissectrice de l'angle α .
La linéarité de cette relation est importante et montre que la méthode de mesure est absolue et ne nécessite pas d'étalonnage.

- Le signal dépend de la taille des particules, de leur position dans le volume de contrôle et l'exactitude de l'alignement optique du système.

Le traitement du signal obtenu est complexe, c'est un signal échantillonné au rythme de passage des particules, sa phase est aléatoire.

Les sources de bruit qui proviennent du laser, de son alimentation, des particules qui traversent le faisceau.

MOULINETS :

Les moulinets sont utilisés pour la mesure de vitesse avec une précision relativement faible, lorsque les vitesses sont petites.

un moulinet est constitué par une hélice, un détecteur et un dispositif (girouette) qui assure l'orientation automatique de l'hélice face au courant. Le détecteur mécanique ou électrique permet de mesurer le nombre de tours effectués par l'hélice, la relation entre la vitesse de rotation et la vitesse du courant est déterminée par étalonnage.

On peut mesurer des vitesses de l'ordre de quelques cm/s : avec une précision de 1% à 2%.

L'inconvénient principal du moulinet, est son encombrement, c'est pourquoi, qu'il n'est pas tellement utilisé en recherche.

4-3- MESURE DE DEBIT:

Les méthodes les plus précises de mesure de débit sont la méthode directe où l'on utilise des pipettes ou des réservoirs jaugés. Ces méthodes sont effectivement utilisées pour l'étalonnage des débit-mètres qui utilisent des méthodes indirectes pour la mesure de débit.

a- COMPTEURS VOLUMETRIQUES

Ils présentent l'avantage de totaliser aisément les quantités de fluide qui les traversent. (eau, gaz, fuel...) Pour les liquides, on utilise des pompes volumétriques à palettes ou à roues, elles conviennent pour les fluides corrosifs et à température élevée. La précision est de l'ordre de 1%, pour un appareil convenablement entretenu.

b- DEBITMETRES DEPRIMOGENES:

Le principe est d'utiliser une différence de pression due à la variation de la direction ou de la valeur de la vitesse pour déterminer le débit volumique. Plusieurs réalisations ont été normalisées: diaphragme, venturi, tuyères. Les normes spécifient: les dimensions du système, la position de la prise de pression, le contrôle à effectuer, lors de la fabrication; ainsi que, les conditions en amont et en aval à respecter, pour avoir une précision de 1% à 2%. L'application du théorème de bernoulli permet d'obtenir une relation entre le débit et la différence de pression.

$$Q_v = A_1 \frac{1}{\sqrt{1-(A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \longrightarrow Q = \alpha Q_v$$

A_1 : Section en amont

A_2 : Section en aval

α : Coefficient de correction du débit qui est de l'ordre de 0.95 L'étalonnage du débitmètre avec ses conduites amont et aval, permet de déterminer le coefficient d'étalonnage qui dépend des caractéristiques géométriques du montage et du nombre de Reynolds. Si le fluide est compressible, on introduit un coefficient multiplicateur de compressibilité.

CHAPITRE - II -

1) MESURE DE L'OSCILLATION

1. MESURES EFFECTUEES A L'USTO.

Notre travail expérimental à l'USTO, comporte deux parties : une étude rhéologique et une étude de perte de charge . Le fluide étudié est une émulsion, dont les composants sont de l'eau, une huile dénommée:

»TASFALOUT 22.B« et un agent tensio-actif.

L'huile de coupe contient préalablement, l'agent tension-actif, qui a la propriété, d'après les expériences qui ont été élaborées, de provoquer une émulsion spontanée et assez stable, pour les concentrations en huile, inférieures à 60%. Pour l'application de cette émulsion en lubrification, le

fabricant de la TASFALOUT , recommande une concentration de l'ordre de 25%.

Pour l'étude rhéologique, une grande partie de concentrations a été examinée, alors que pour celle de la perte de charge, la concentration maximale était de l'ordre de 50% en huile. Jusqu'à cette limite, le comportement rhéologique de l'émulsion peut être considéré, comme newtonien. Pour les concentrations plus élevées, l'émulsion a un comportement non-newtonien; mais sa viscosité élevée, ne nous permet pas d'atteindre le régime turbulent en conduite.

1.1. DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE.

Les mesures viscosimétriques de l'eau et de l'émulsion, pour différentes concentrations, ont été réalisées avec un viscosimètre rotatif de type: SEARLE (voir : CLASSIFICATION des viscosimètres). Ce viscosimètre »Rhéomat 30« dispose d'une gamme de 30 vitesses de cisaillement et de 4 systèmes de mesures. Le système utilisé a un entrefer: $e = 13 \text{ mm}$ et un rapport de rayons: $\delta = 1.05$. C'était, le seul système parmi les autres, qui nous donne des mesures relativement stables. Le »Rhéomat 30«, était démunie de système de thermostat; qui permette de maintenir la température du fluide constante, pendant le cisaillement. De ce fait; les résultats obtenus ne peuvent être qu'indicatifs, ils nous permettent; néanmoins, de faire une étude qualitative de l'évolution de la viscosité de l'émulsion en fonction de la concentration, d'une part, et du gradient de vitesse, d'autre part .

1-2. RESULTATS EXPERIMENTAUX:

Les différents rhéogrammes, ont été obtenus, en faisant varier la vitesse de cisaillement et en faisant la lecture du couple appliqué au rotor, qui est traduit ensuite, en contrainte de cisaillement.

D'après les premiers résultats (planches: 1 - 2 - 3 - 4 - 5), On peut remarquer:

- L'existence d'une contrainte seuil, qui est de l'ordre de 1- Pascal, pour toutes les concentrations (cas de l'eau toute seule), on suppose que cette erreur systématique, est due à la difficulté de régler le zéro de l'appareil.

- Que l'appareil ne répond pas bien pour les gradients de vitesse inférieurs à environ $30. S^{-1}$

- La pente de la droite, qui représente le rhéogramme de l'eau (Planche: 3), est supérieure à 1, pour les gradients de vitesse supérieurs à $125 S^{-1}$. Cette erreur, montre que le système utilisé, n'est pas adapté aux mesures de faibles viscosités. De ce fait; on ne peut pas donner des conclusions, concernant Les émulsions de concentrations 26.4% et 32.6%.

Pendant, les mesures de perte de charge, nous avons fait des mesures viscosimétriques en parallèle; en faisant un prélèvement d'échantillons, pour les concentrations inférieures à 50%. Les résultats obtenus de viscosité (Planche:5), nous ont servis dans le calcul du nombre de Reynolds.

Après avoir corrigé les mesures, en tenant compte des remarques ci-dessus; on obtient les résultats finaux; (Planches: 1c - 2c - 3c - 4c):

Pour les concentrations supérieures à 48% : il existe deux types de comportement:

Un comportement newtonien pour l'huile » TASFALOUT « à 100% et un comportement non-newtonien pour les autres concentrations.

Les concentrations de comportement non-newtonien, se divisent en deux catégories:

Comportement à loi de puissance pour les concentrations 48.6% et 85%, pour les gradients de vitesses supérieurs à $80 S^{-1}$;

ainsi, que la concentration 92% pour les gradients de vitesse supérieurs à $120.S^{-1}$

- Comportement rhéologique, qui n'est pas vérifié par la loi de puissance, pour les concentrations 66.6% et 73%.

Le deuxième résultat intéressant et qui semble spécifique à cette émulsion huile-eau, c'est l'existence de deux pics dans la courbe de la viscosité en fonction de la concentration (Planche: 4c). La position des pics est indépendante du gradient de vitesse.

Le premier pic, qui est le plus important, correspond à une concentration de 73%.

Cette forte augmentation de viscosité pourrait correspondre à une inversion de phases: pour les concentrations supérieures à 73%, l'émulsion est de type eau dans l'huile; alors que pour les concentrations inférieures, l'émulsion est de type huile dans l'eau. Ceci; reste à vérifier au niveau microscopique.

Le deuxième pic, moins important correspond à une concentration de 92%.

Une étude plus approfondie, avec un appareillage adapté, serait nécessaire pour en expliquer l'origine.

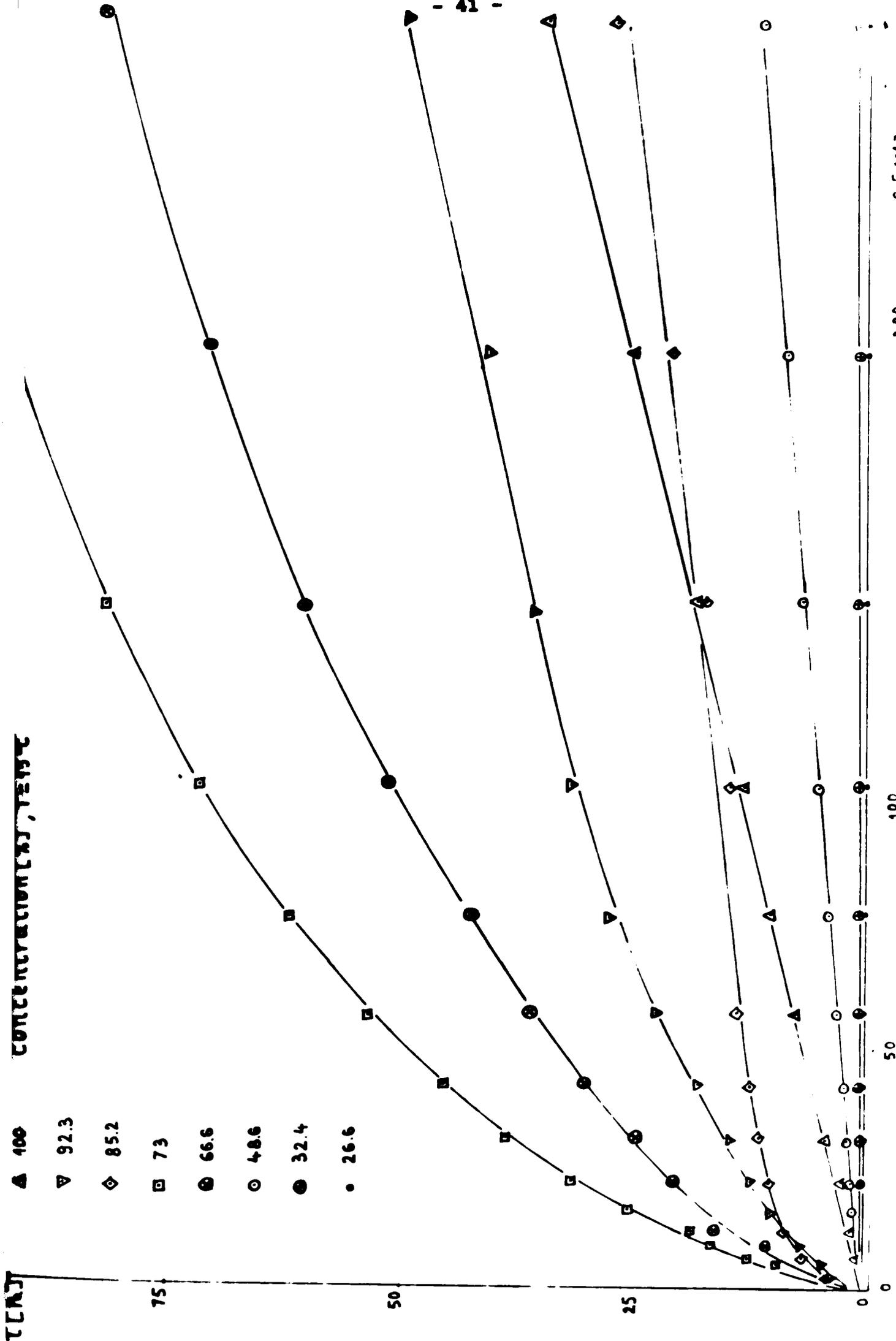


PLANCHE 1 : RHEOGRAMME DES EMULSIONS DE »TASFALOUT«

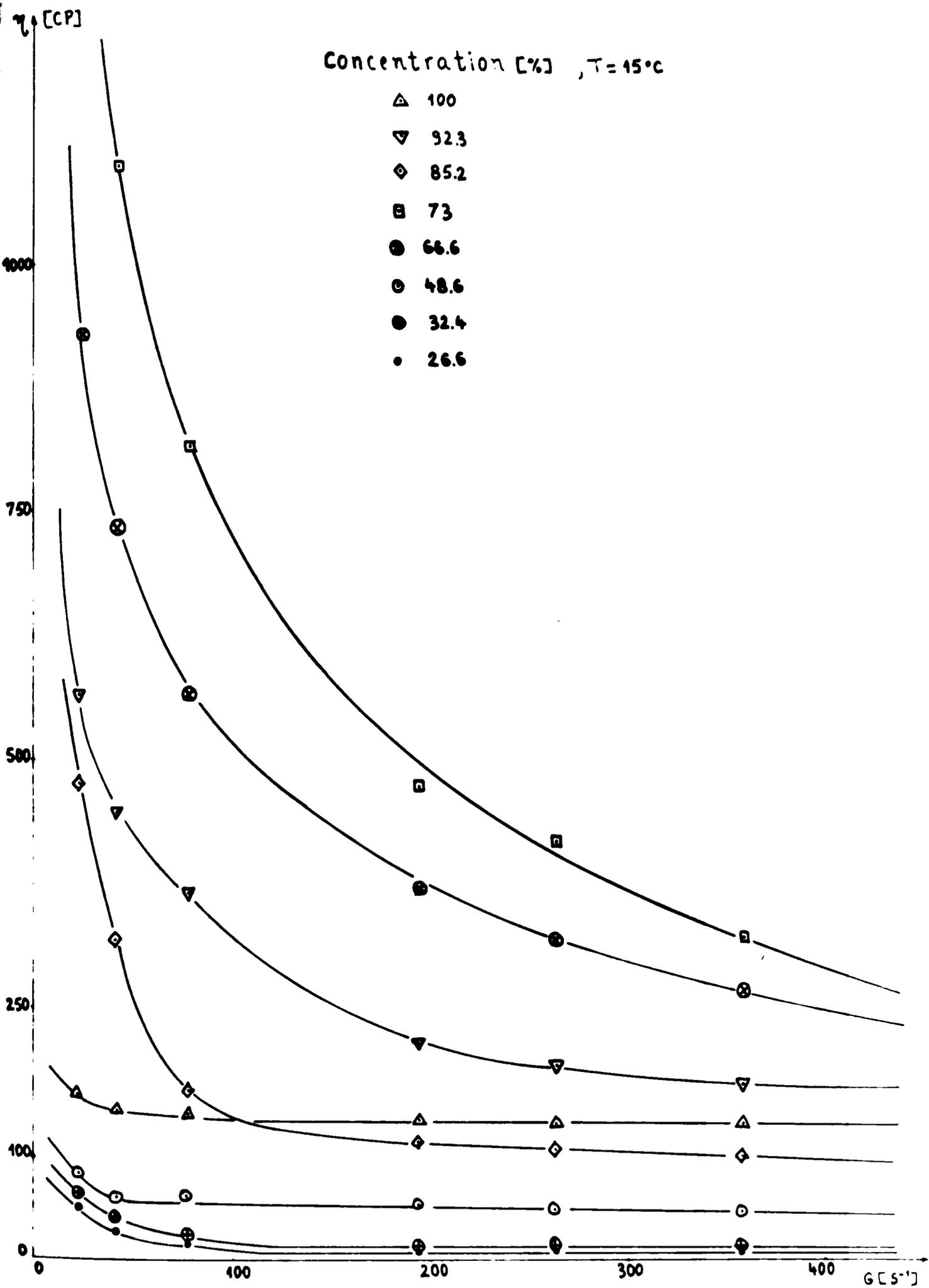


PLANCHE 2 : EVOLUTION DE LA VISCOSITE EN FONCTION DU GRADIENT DE VITESSE.

Concentration [%], T=15°C

τ [Pa]

- △ 100
- ▽ 92.3
- ◇ 85.2
- 73
- 66.6
- 48.6
- 32.4
- 26.6
- 0 (eau)

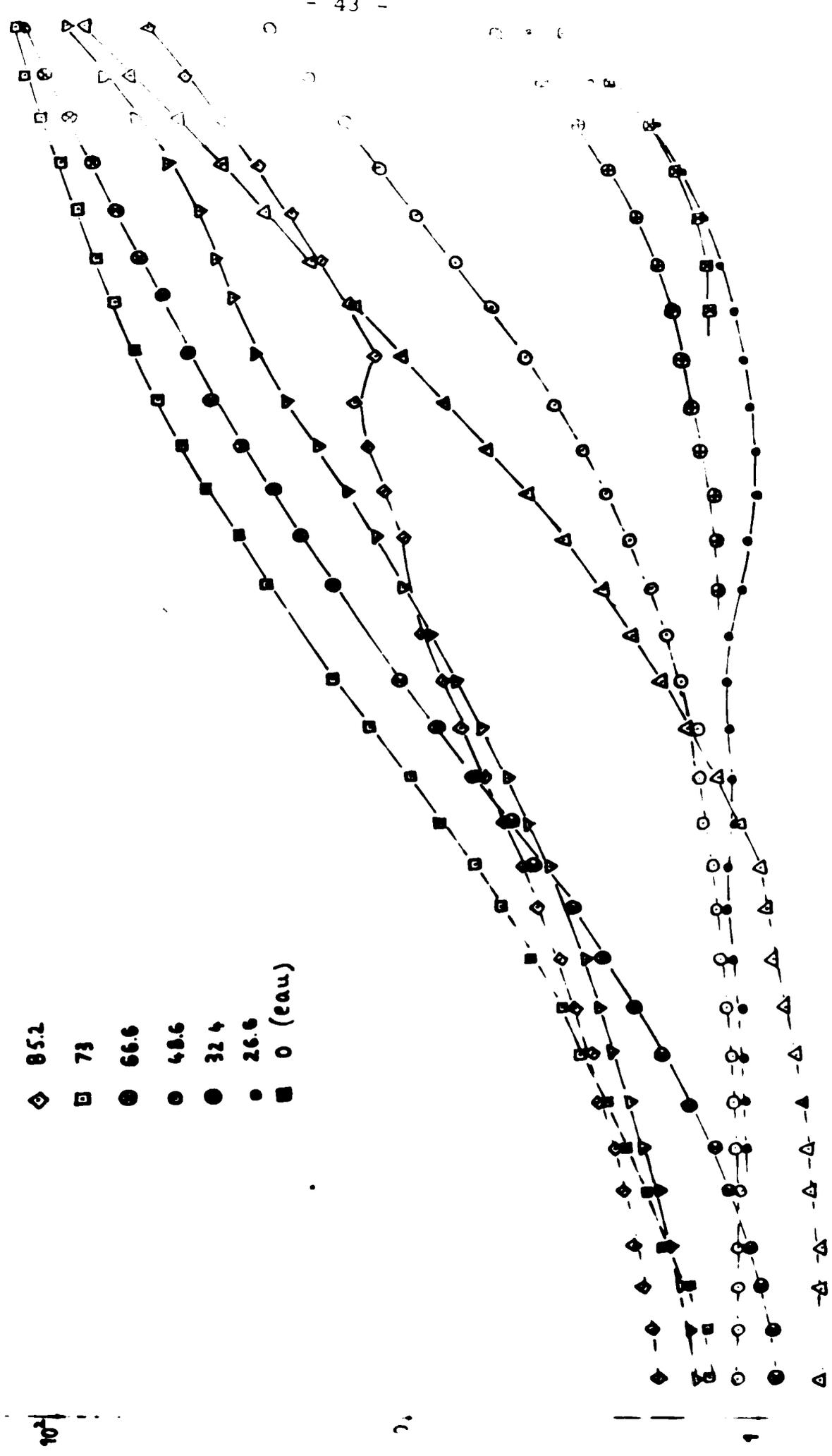


PLANCHE 3: RHEOGRAMME DES EMULSIONS DE TASFALOUT

[CP]

Gradient de vitesse [s^{-1}], $T=15^{\circ}C$

△ 41.7

◆ 77.1

▽ 193.8

● 350

■ 662



Planche 4: Influence de la Concentration.

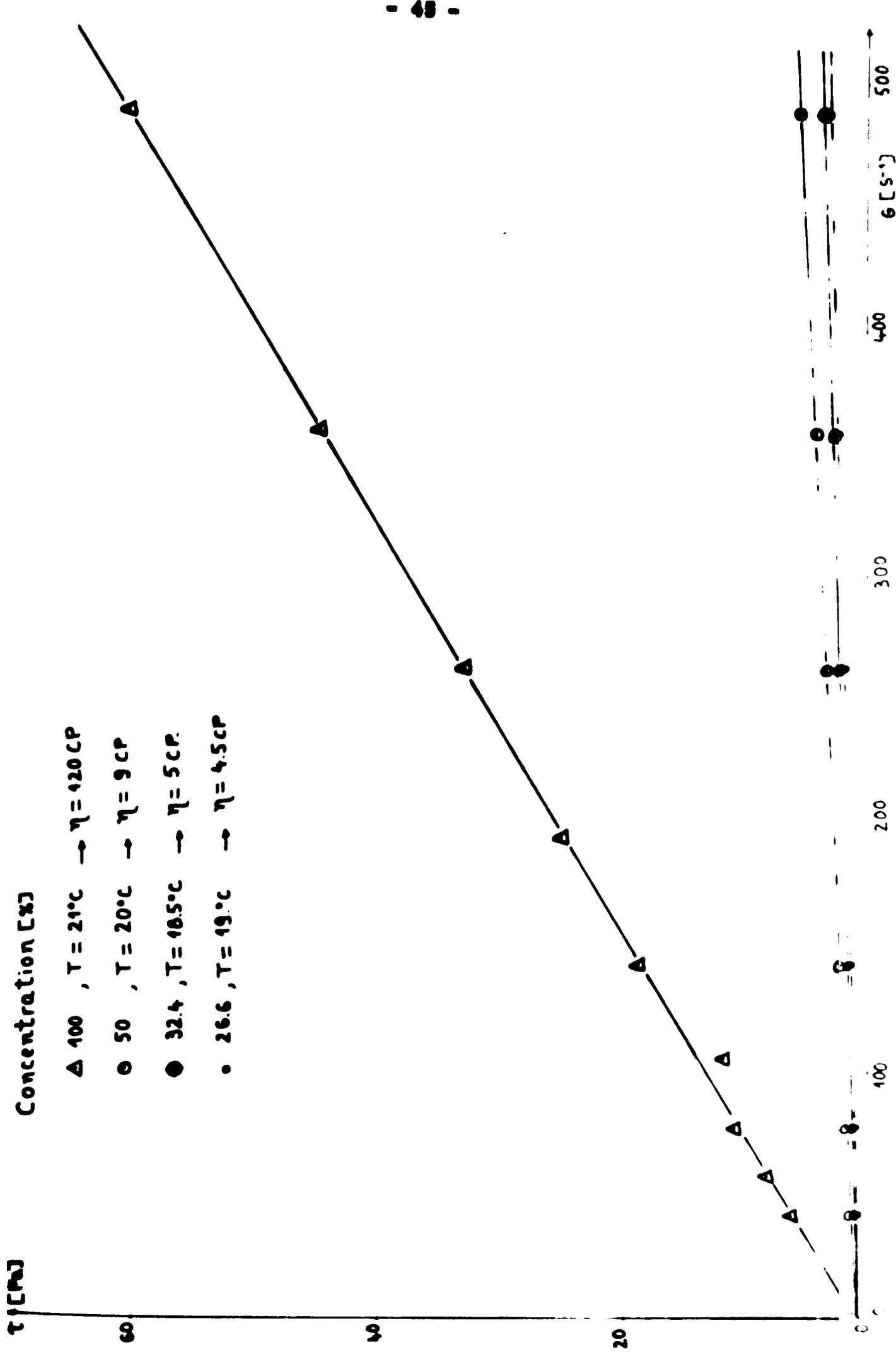


Planche 5: Rhéogramme des émulsions newtoniennes.

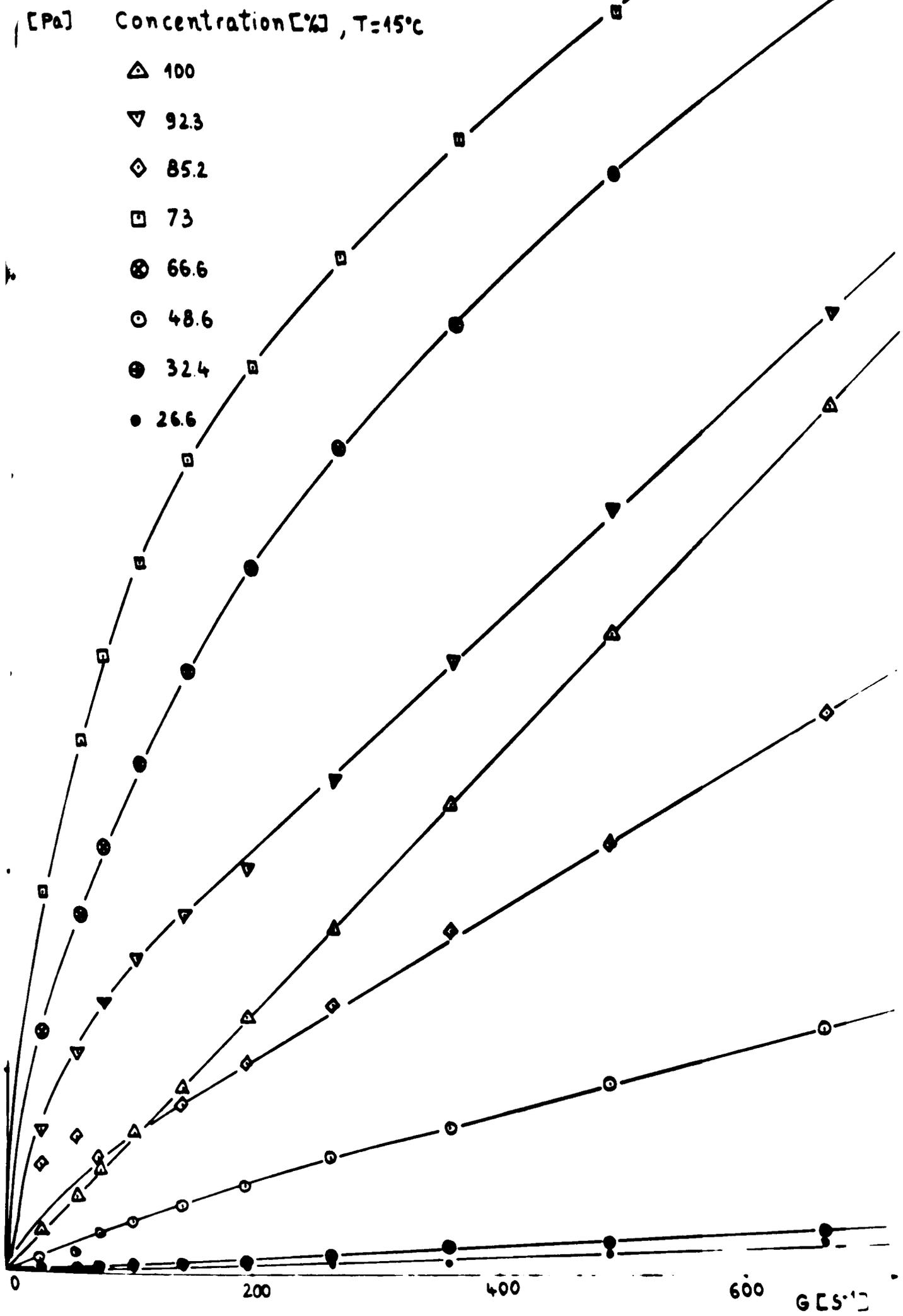


Planche c : Rhéogramme des émulsions de » TASFALOUT« .

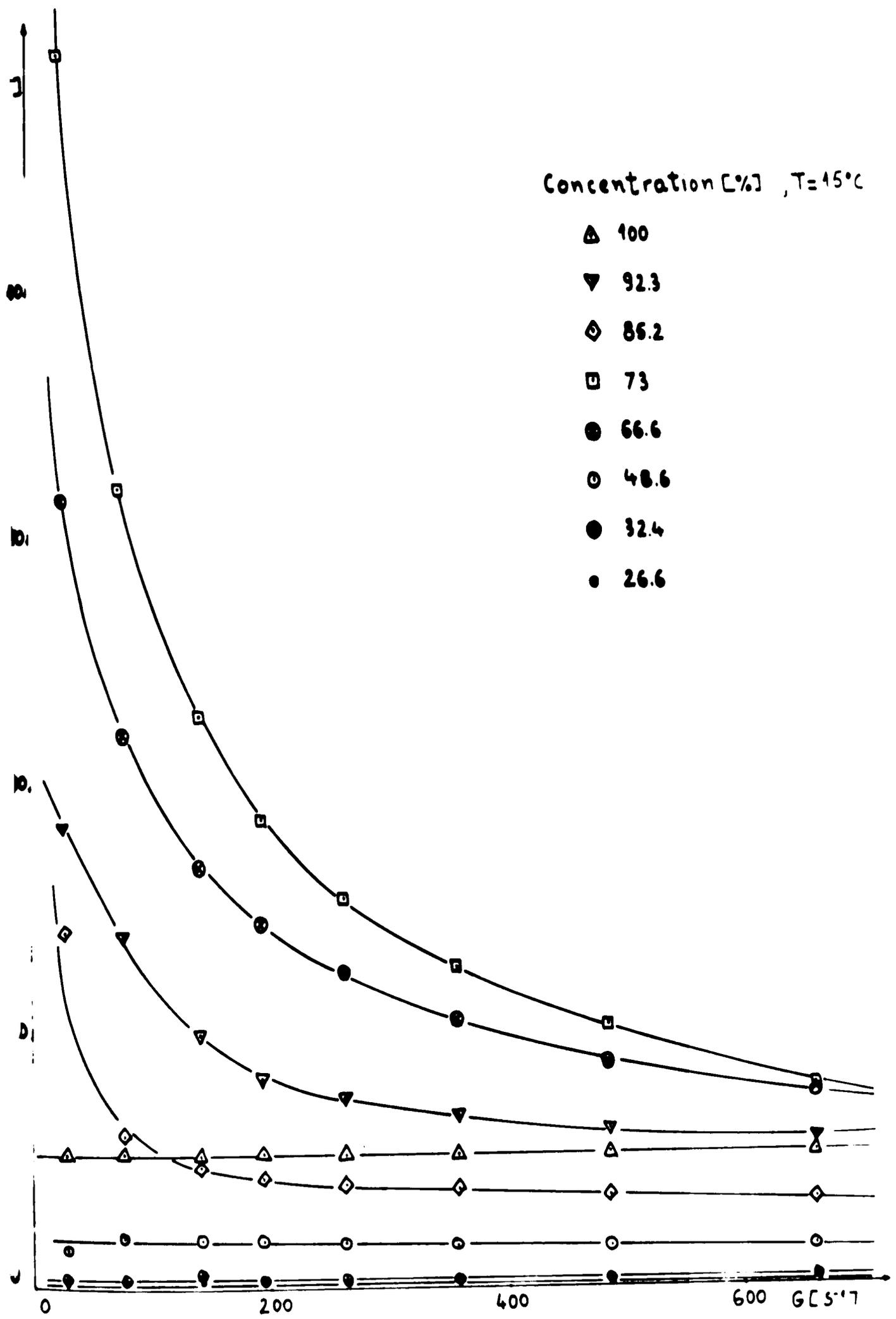


Planche 2 C : Evolution de la viscosité en fonction du gradient de Vitesse.

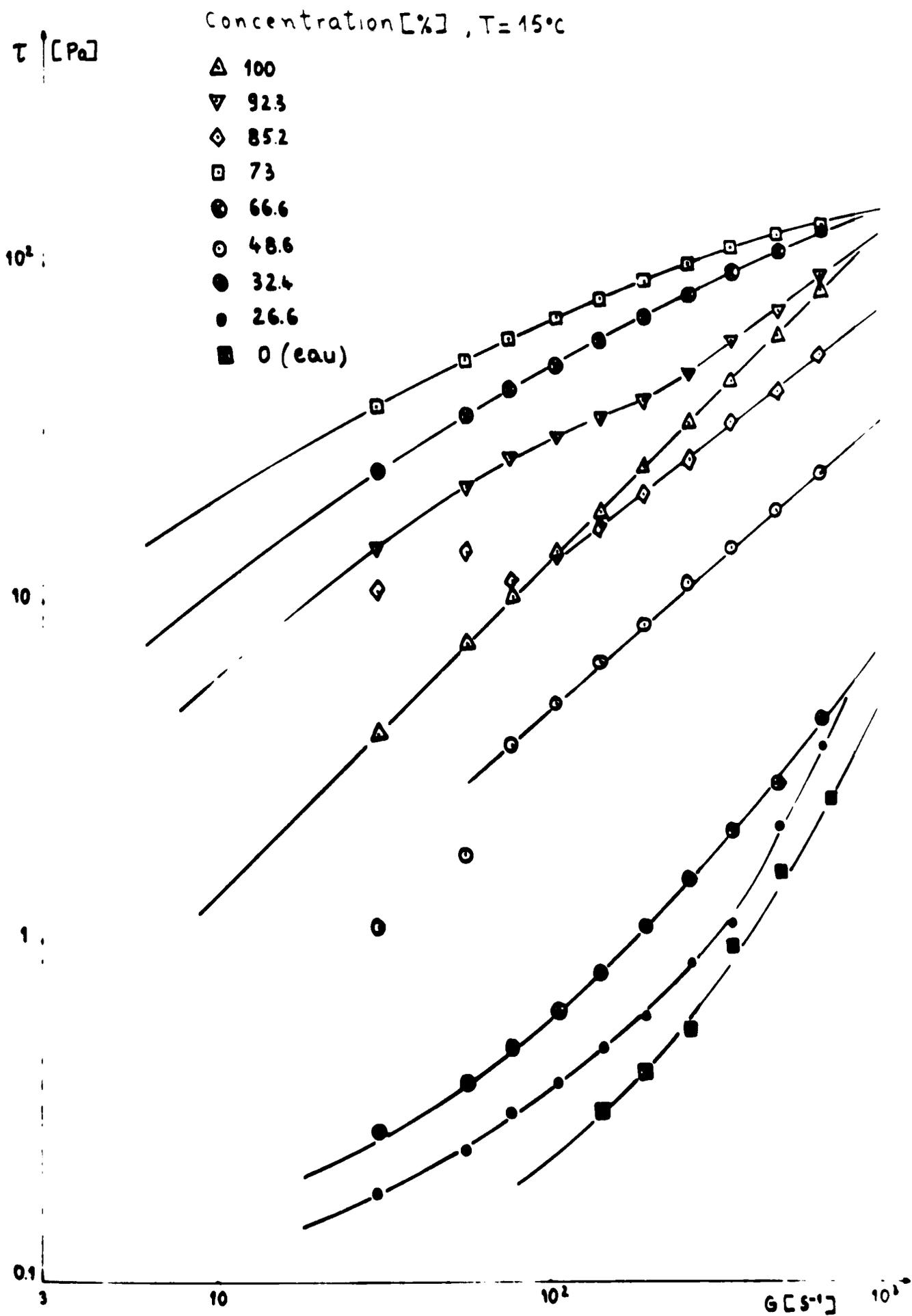


Planche 3C: Rhéogramme des émulsions de » TASFALOUT « .

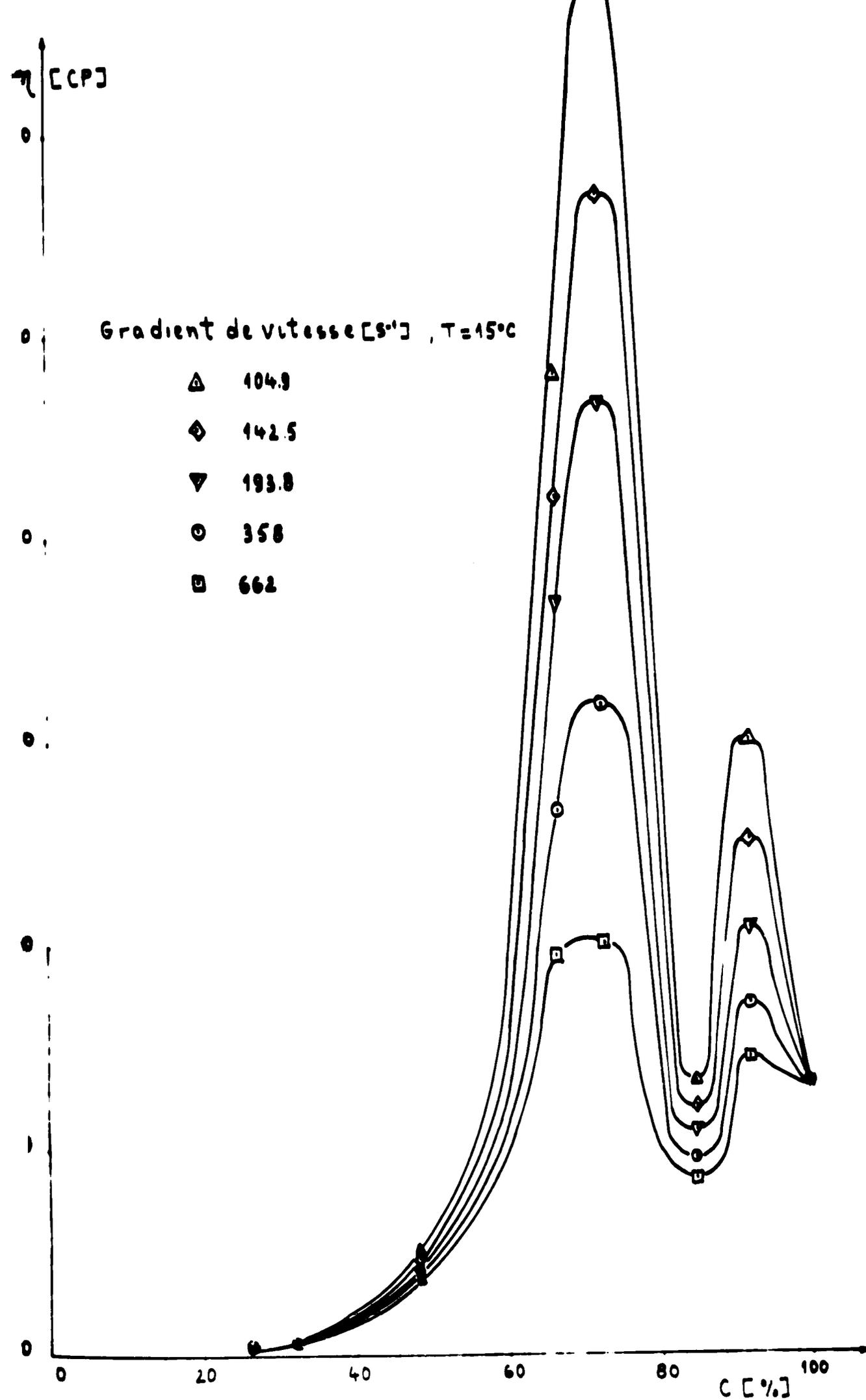


Planche 4C: Influence de la concentration.

2- MESURES EFFECTUEES A L'I.M.F.S .

2- 1- DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE:

Le viscosimètre utilise dans l'étude rhéologique relative à notre travail est un viscosimètre rotatif à cloche, dénommé »ROTOVISKO«, qui se compose, principalement des éléments suivants:

a- DISPOSITIF DE MESURE, TYPE:COUETTE.

Ce système est prévu pour des mesures précises, il comprend en effet; une enceinte thermostatée qui permet, par une circulation du liquide, de maintenir la substance à examiner, à une température constante. L'élément de mesure est un dispositif -NV- (Planche :III) , qui se compose d'un mobile en forme de cloche (ROTOR) et d'un béccher fixe (GODET) qui épouse cette forme. Après montage, le béccher et le mobile définissent deux espaces annulaires concentriques; dans lequel se trouve logée la substance à étudier

b- PUPITRE DE COMMANDE ET DE LECTURE:

Le pupitre se compose d'un moteur synchrone (3.000tr./mn), d'une boîte de vitesse (gamme de 10 vitesses) et du compartiment électronique. Les mesures sont faites par l'intermédiaire d'un galvanomètre.

A côté du cadran de lecture se trouvent:

- Un interrupteur principal.
- Un commutateur qui permet le réglage de la sensibilité.
- Un inverseur qui permet d'effectuer la mesure sur le cadran ou d'envoyer le signal sur un enregistreur.
- Une vis qui commande l'ajustage du zéro électrique.
- Une vis qui commande l'ajustage de la sensibilité de l'enregistreur.

c- TETES DE MESURE.

Chaque tête comprend un dynamomètre à torsion constitué par un ressort hélicofdal. Ce dynamomètre établit la liaison entre l'arbre moteur et l'arbre qui porte le rotor. Ces deux arbres sont disposés suivant un même axe; si bien que l'angle de torsion du dynamomètre représente le moment de rotation appliqué au rotor.

La tête de mesure utilisée est une tête combinée 500/50, qui comporte, rassemblées sous le même boîtier, une tête 500 et une tête 50, dont leurs moments maximum sont respectivement:

500 et 50 gr. Cm. Cette tête combinée est fixée sur un bras support spécial, qui est maintenu par deux vis, sur la face latérale du pupitre.

d- FLEXIBLE DE TRANSMISSION.

La liaison électrique et la transmission mécanique entre le pupitre de commande et de lecteur, et la tête de mesure est assurée par un câble métallique flexible. Cette transmission souple est sans influence sur l'exactitude de la mesure.

2-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX.

Les mesures viscosimétriques ont été effectuées avec la tête combinée 500/50. Les résultats obtenus, nous ont révélé un décalage entre les mesures de la tête 500 et celles de la tête 50. On a pu vérifier, ensuite que la tête 50 était défectueuse.

Les mesures obtenues avec cette dernière, ne peuvent être considérées comme précises, elles peuvent être seulement indicatives: ceci, concerne particulièrement la glycérine diluée à 25 et 50% et les solutions de Polyox.301.

a- FLUIDE NEWTONIEN: SOLUTIONS DE GLYCERINE: (PLANCHES:6-7)

On a utilisé la glycérine pure, de densité égale à 1,26, la viscosité est presque constante en fonction du gradient de vitesse. Les valeurs moyennes sont respectivement 5 centi-Poises et 13 centi-Poises.

La mesure de la viscosité de la glycérine pure, a été effectuée avec la tête 500 et elle s'accorde très bien avec les mesures effectuées dans d'autres laboratoires. La valeur de la viscosité est de l'ordre de 146 Centi-Poises. Ce résultats, nous a permis de vérifier la bonne réponse de l'appareil, munis de la tête 500 .

b- FLUIDE NON-NEWTONIEN: SOLUTIONS DE POLYOS.301. (PLANCHES:8.9.10. 11.)

Le comportement rhéologique, des solutions de polyox, était bien vérifié par les résultats représentées dans les planches Su- Citées.

On peut observer, essentiellement, que:

- La viscosité varie en fonction du gradient de vitesse.
- Pour les faibles concentrations de POLYOX, la viscosité est presque constante pour les gradients de vitesse supérieurs à 900₃
- Pour les grandes concentrations, la viscosité diminue avec l'augmentation du gradient de vitesse.

- L'effet d'hystérisis devient assez marqué, pour les grandes concentrations; ceci peut s'expliquer par un faible effet thixotropique et par une dégradation des molécules (longue chaîne); sous l'effet d'un cisaillement important.

c- EMULSIONS DE »TASFALOUT« (PLANCHES: 12-13-14-15).

L'émulsion utilisée est un mélange hétérogène, d'une huile de coupe »TASFALOUT«, de l'eau distillée et de l'agent tensio-actif, préalablement contenu dans l'huile. En grande partie, les résultats obtenus avec le »ROTOVISKO«, ont confirmé ceux obtenus à l'USTO par le »Rhéomat.30« . Les mesures ont été effectuées avec la tête 500 et peuvent être considérés comme, relativement assez précis. On peut observer trois types de comportement pour les concentrations supérieures à 50%.

- Un comportement newtonien pour la TASFALOUT à 100%, la viscosité est quasi-constante et de l'ordre de 115 Centi-Poises à la température de 19.8° C.

- Un comportement non-newtonien, de type pseudo-plastique pour les concentrations 55% et 85%. La concentration 85% a un comportement proche du comportement newtonien pour les gradients de vitesse supérieurs à 400 [S⁻¹].

La concentration 55% a un comportement non-newtonien plus marqué; ceci explique la faible courbure rhéologique de la concentration 85% par rapport à la 55%. Ceci, est dû au fait que le pourcentage relatif d'eau dans l'huile est beaucoup plus faible pour la concentration 85% que pour la concentration 55%.

- Un comportement non-newtonien, qui n'est pas vérifié par le modèle d'Ostwald pour les concentrations 65% et 75%.

La représentation graphique de l'influence de la concentration pour différents gradients de vitesse a permis de mettre en évidence l'existence du pic de viscosité pour la concentration 75%, ceci, confirme le résultat obtenu à l'USTO.

Pour les différentes concentrations, l'effet d'hystérisis n'a pas apparu. La mesure de la viscosité des concentrations inférieures à 50%, a été effectuée avec la tête 50 et de ce fait, on ne peut donner des conclusions précises.

3- ANALYSE DES RESULTATS:

Notre analyse, concerne particulièrement les mesures rhéologiques de l'émulsion de TASFALOUT . Les résultats obtenus sont résumés dans la planche.II.

D'une manière générale; on peut dire que les mesures rhéologiques de l'émulsion effectuée à l'IMFS, ont confirmé ceux obtenus à l'USTO. On peut retenir principalement, de cette étude rhéologique, les résultats suivants:

- Un comportement newtonien de la » TASFALOUT « et un comportement quasi-newtonien des concentrations inférieures à 50%.
- Un comportement non-newtonien à loi de puissance, décrit par le modèle d'Ostwald pour les concentrations comprises entre 50% et 65% D'une part et les concentrations comprises entre 75% et 100% d'autre part, l'indice de puissance de leurs modèles est inférieur à l'unité, de ce fait; elles sont de types pseudo-plastiques.
- Un comportement non-newtonien, qui n'est pas vérifié par la loi de puissance (l'indice de puissance varie en fonction du gradient de vitesse), pour les concentrations comprises entre 65% et 75%.
- Existence d'un pic de viscosité pour la concentration de l'ordre de 75%. La viscosité correspondante est maximum pour le gradient de vitesse le plus petit ($G = 16.17 \text{ (S}^{-1}\text{)}$, $T = 19.8^\circ\text{C}$) et elle est de l'ordre de 1600CP. (résultat à l'IMFS). La valeur minimum de la viscosité qui correspond au pic est pour le gradient de vitesse le plus grand, sa valeur est deux fois plus grande que celle de la » TASFALOUT « pure.

Ce résultat, nous fait savoir; qu'il est dangereux pour les installations qui ne sont pas adaptées, de faire écouler l'émulsion de » TASFALOUT « à des concentrations voisines de 75%.

La représentation graphique de la viscosité en fonction du gradient de vitesse (Planches:2c-13), nous révèle des résultats identiques obtenus à l'IMFS et à l'USTO:

La courbe tend vers une limite asymptotique pour : $G \rightarrow 0$ et décroît d'une manière exponentielle pour les gradients de vitesse plus élevés.

Une étude rhéologique assez poussée, dans la marge des concentrations 65% et 85%, permettrait de déterminer avec le plus de précision, la concentration qui correspond au pic de viscosité; ainsi que les concentrations qui limites les deux types de comportement non-newtonien. Toute fois; on remarque quelques différences entre les résultats numériques obtenus à l'IMFS par rapport à celles obtenus à l'USTO. Ceci; est dû à la différence de température auquel a été examiné les échantillons de l'émulsion, d'une part, et à la précision relative des viscosimètres utilisés, d'autre part.

L : II . III . ()				I . II . III . IV					
C (%)	K	n	Comportement	Modèle	C (%)	K	n	Comportement	Modèle
=15°C					=19.8°C				
100	0.14	1	NEWTONIEN	$\tau=0.14G$ NEWTON	100	0.1	1	NEWTONIEN	$\tau=0.1 G$ NEWTON
92.3	0.8	0.74	Loi de puissance (pseudo-Plastique)	$\tau=0.8G^{0.74}$ OSTWALD					
85.2	0.38	0.77	Loi de puissance (Pseudo-Plastique)	$\tau=0.38G^{0.77}$ OSTWALD	85	0.18	0.91	Loi de puissance (Pseudo-Plastique)	$\tau=0.18G^{0.91}$ OSTWALD
73		$n=f(G)$	Non-Newtonien		75		$n=f(G)$	Non-Newtonien	
66.6		$n=f(G)$	Non-Newtonien		65		$n=f(G)$	Non-Newtonien	
48.6	0.09	0.86	Loi de puissance (Pseudo-Plastique)	$\tau=0.09G^{0.86}$ OSTWALD	55	0.56	0.69	Loi de puissance (Pseudo-Plastique)	$\tau=0.56G^{0.69}$ OSTWALD

PLANCHE II: Tableau des mesures rhéologiques des émulsions de « TASFALOUT » .

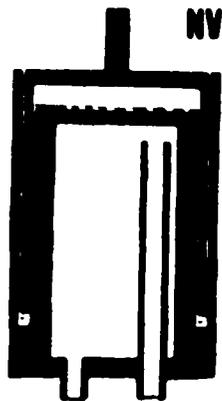
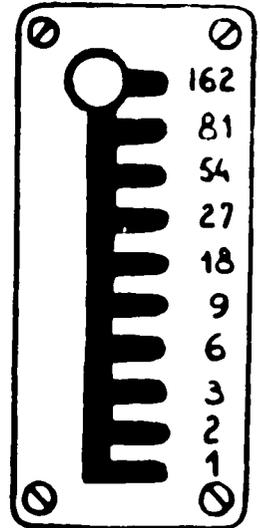
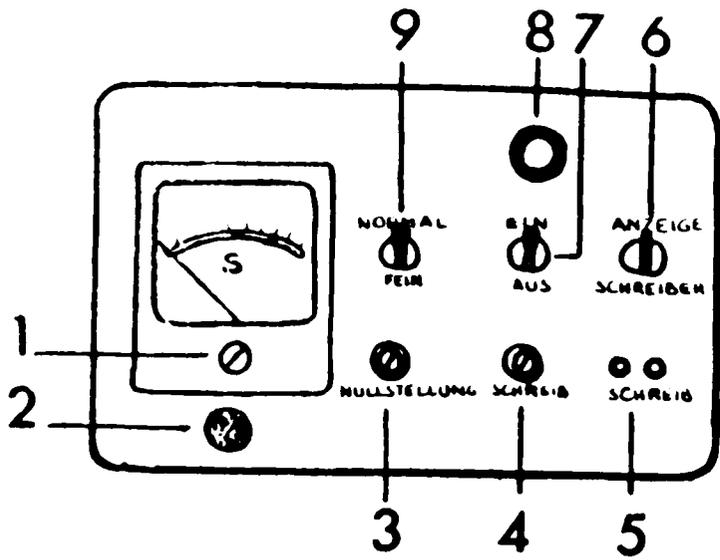


PLANCHE III: DISPOSITIF de mesure rhéologique.

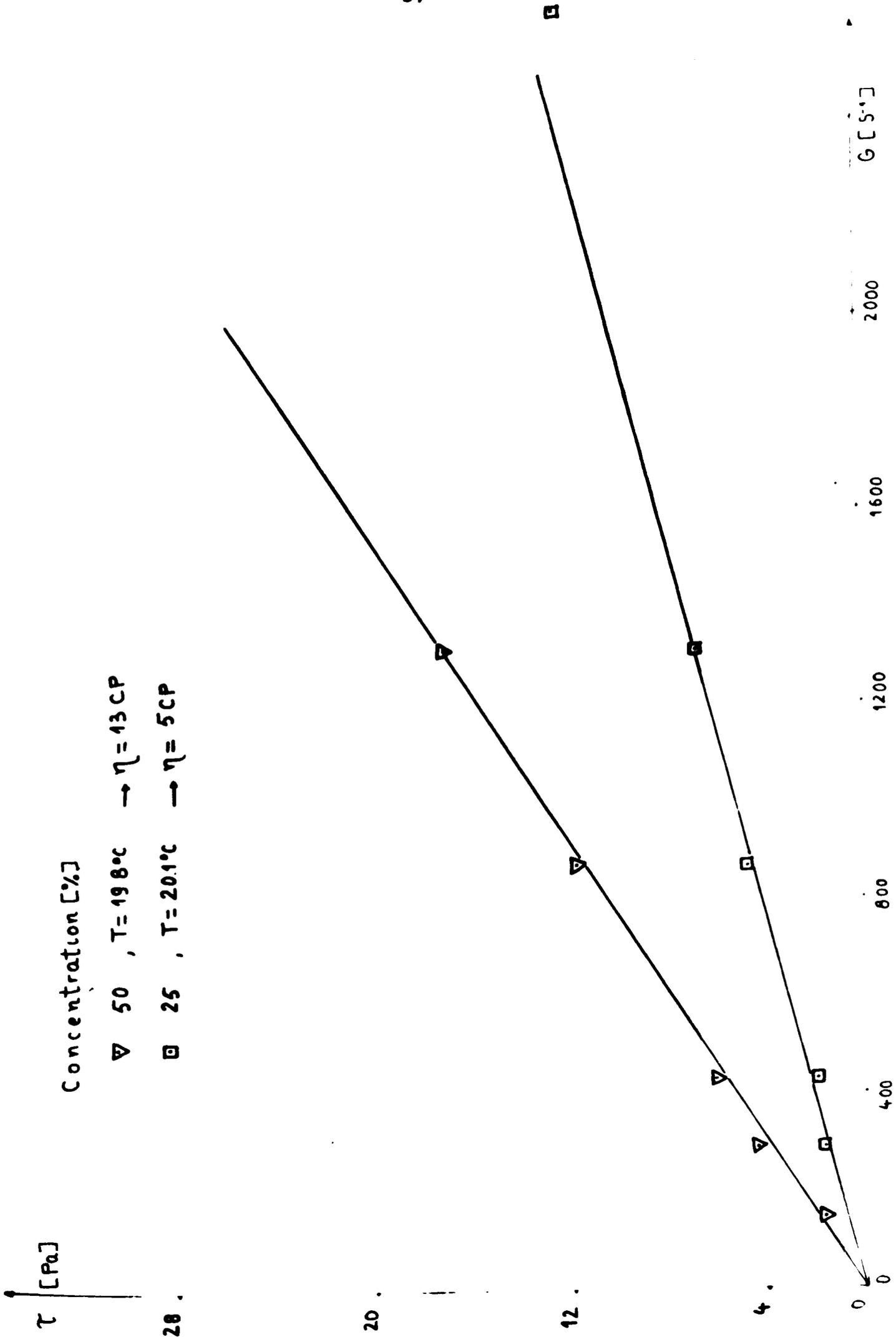


PLANCHE 6: Rhéogramme des solutions de glycérine.

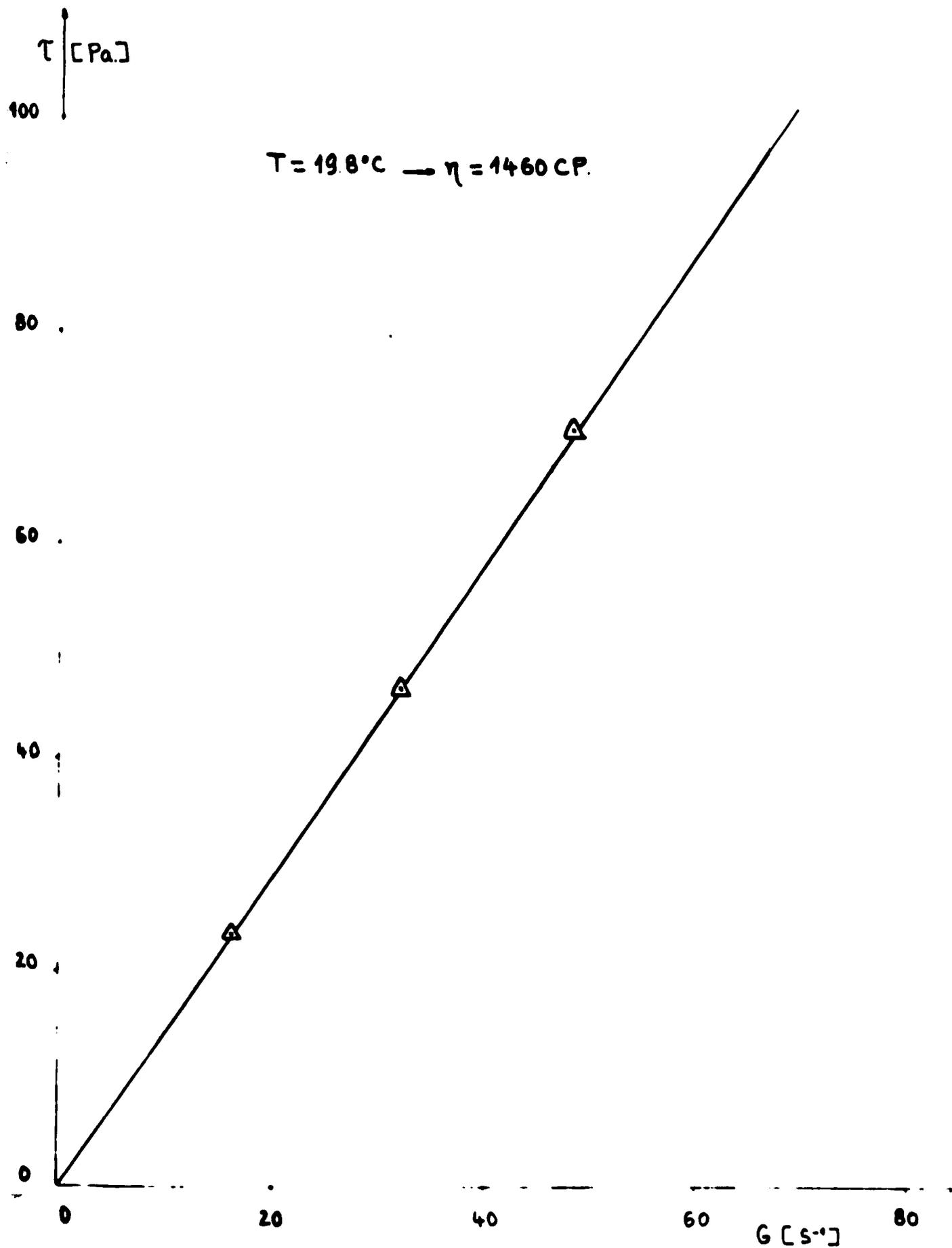


Planche 7: Rhéogramme de la glycérine pure.

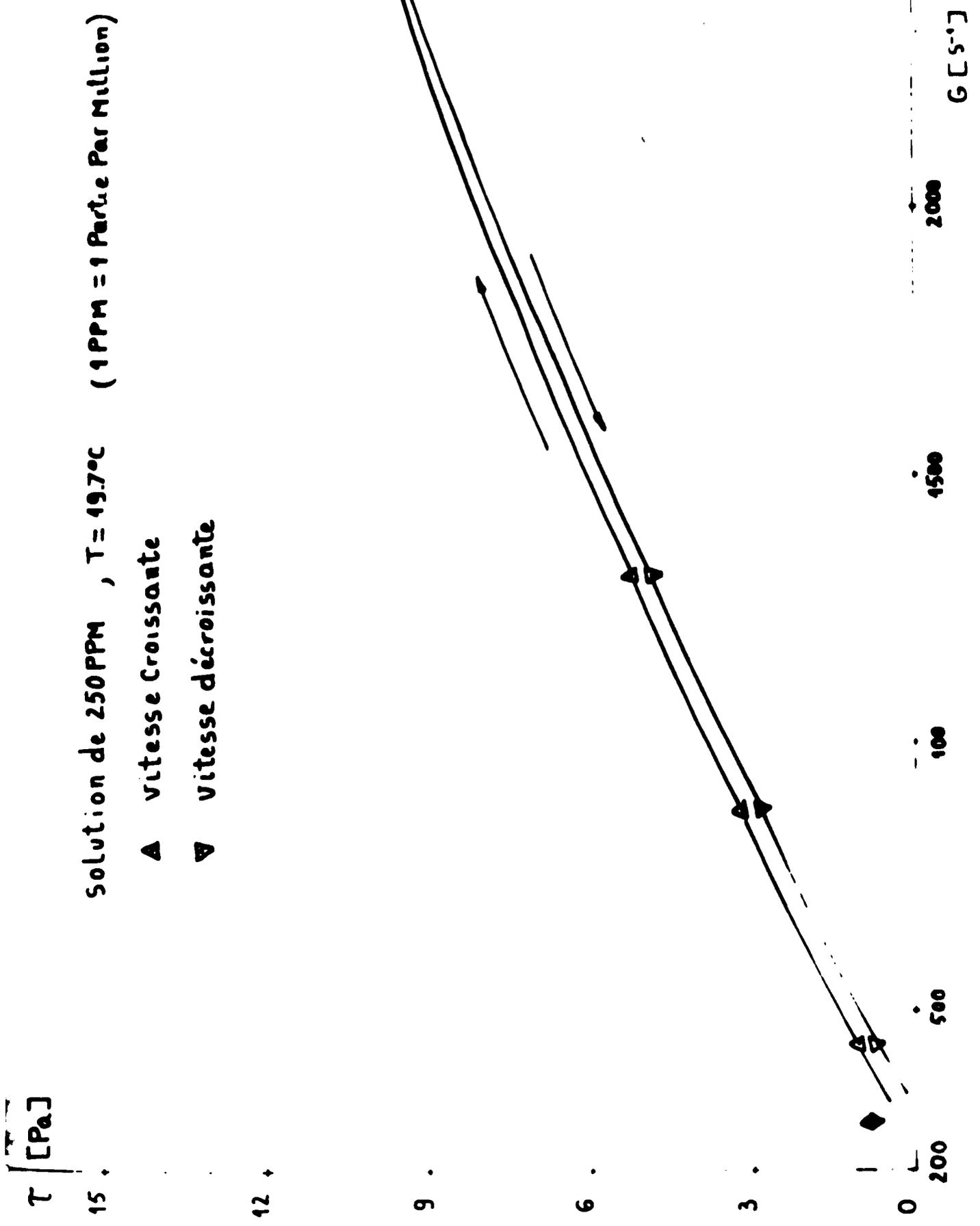


Planche 8: Rhéogramme d'une solution de POLYCX.301.

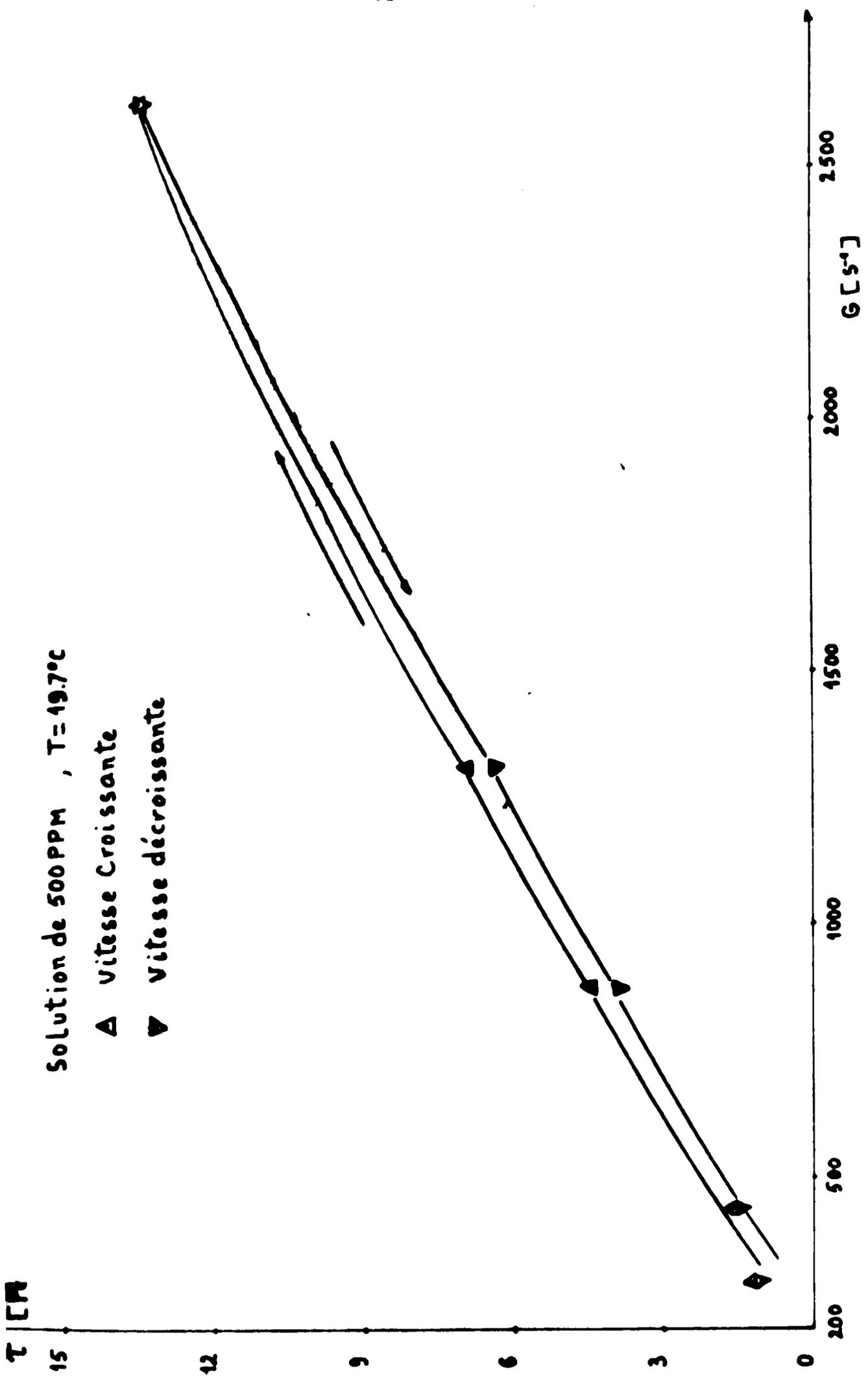


Planche 9: Rhéogramme d'une solution de. POLYOX. 301

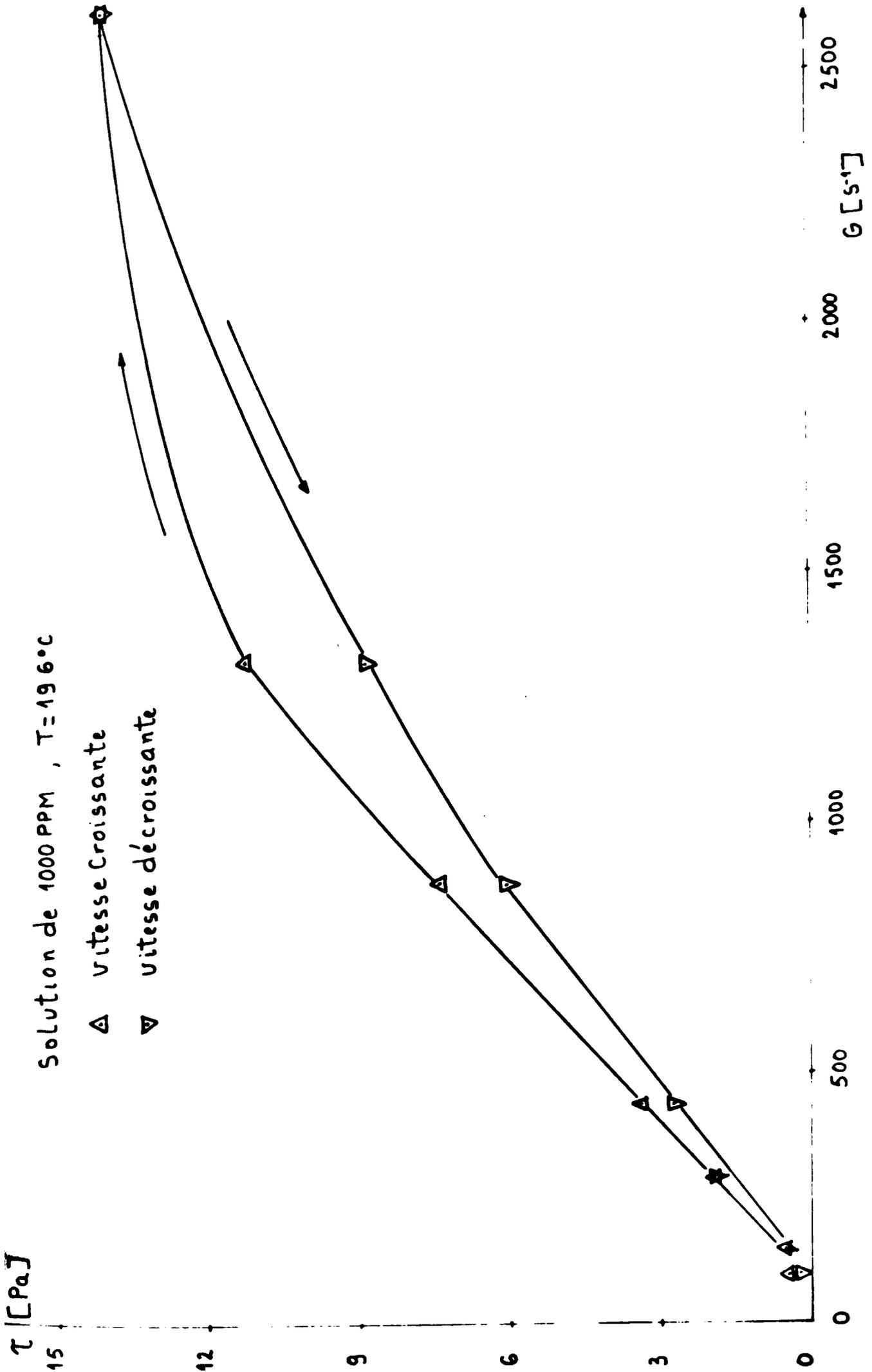


Planche 10: Rhéogramme d'une solution de. POLYOX.30I.

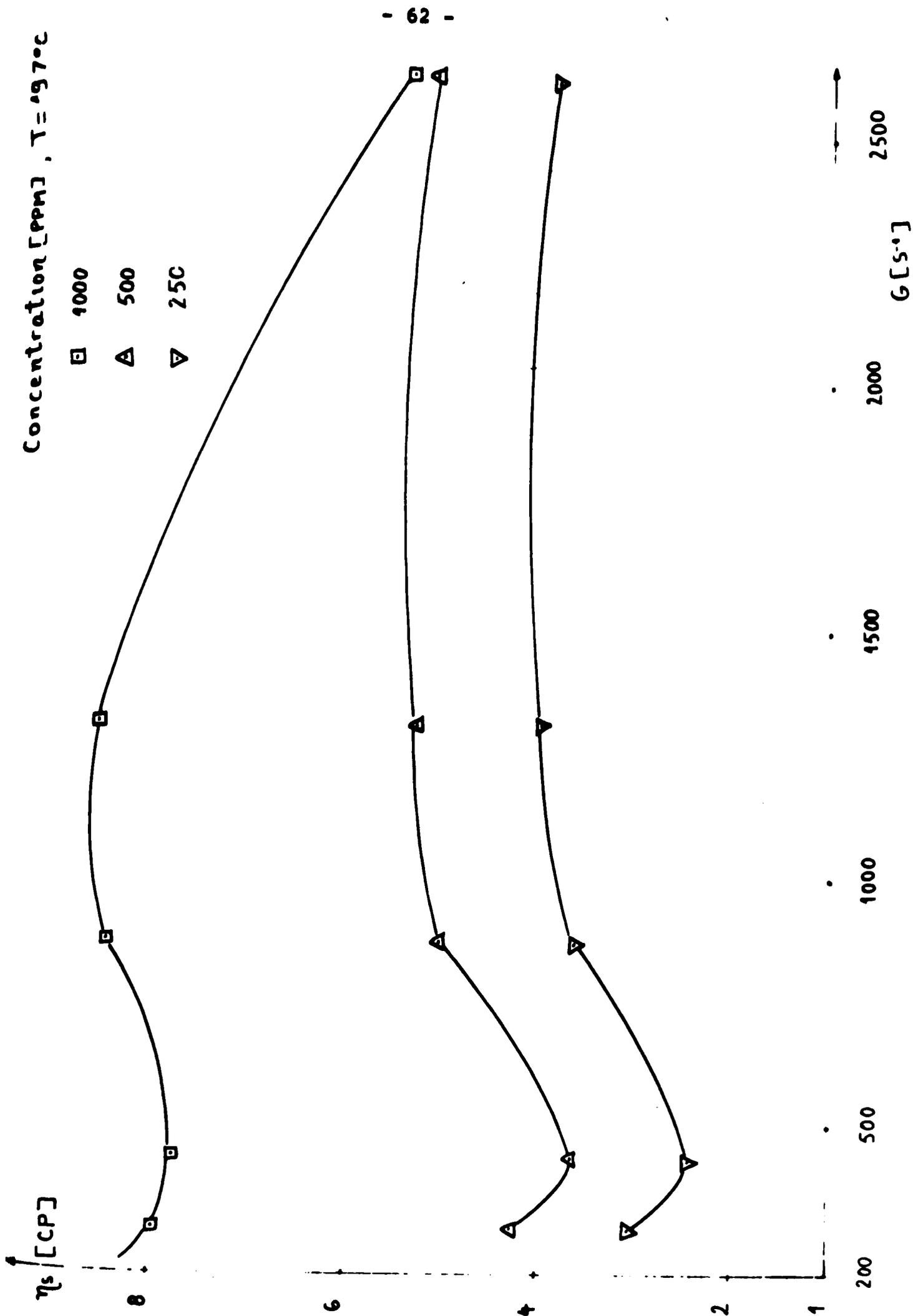


Planche 11: Influence de la Concentration du. POLOX.30I

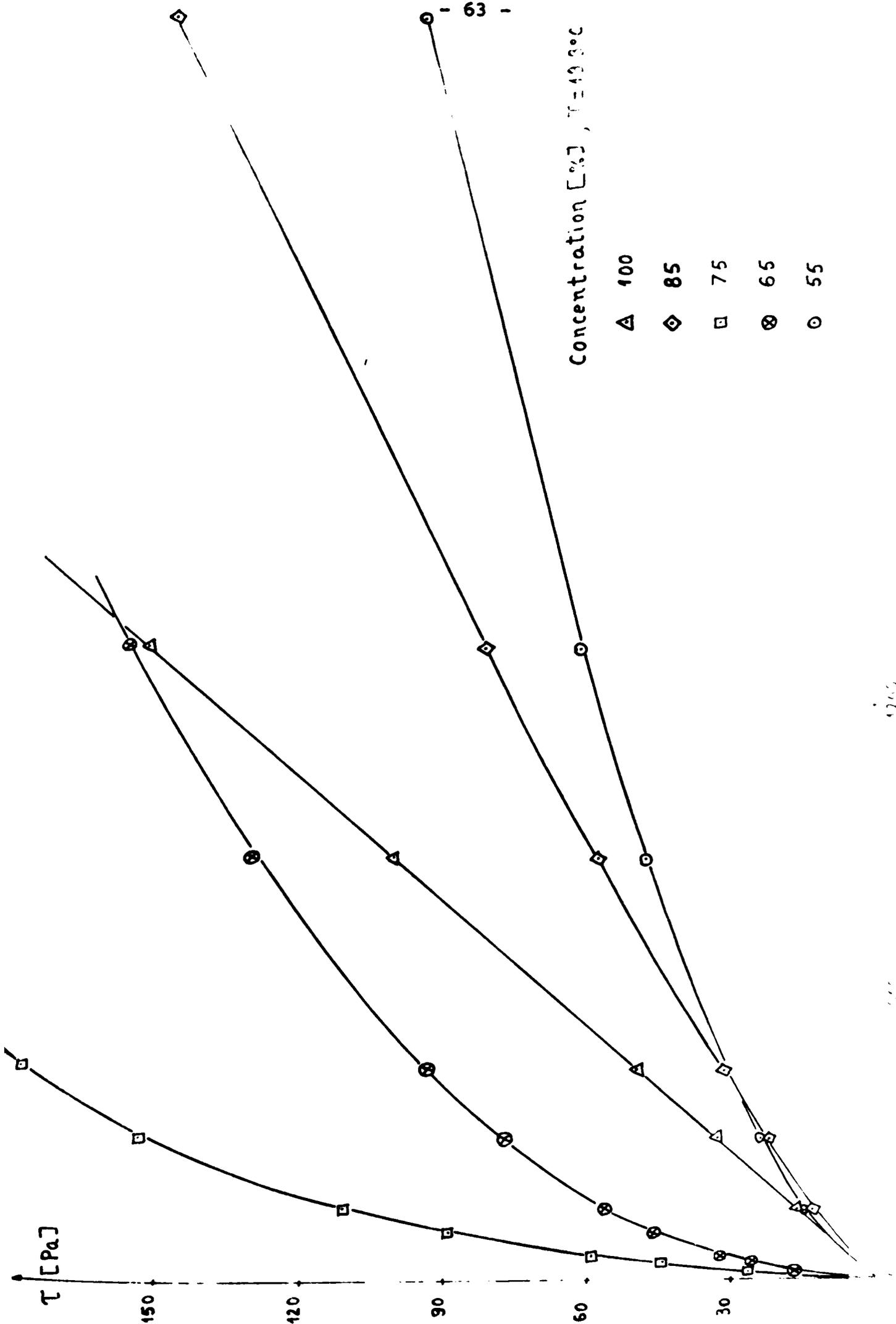


Planche 12: Rhéogramme des émulsions de »TASFALOUT« .

Concentration [%], T = 19.8°C

- △ 100
- ◇ 85
- 75
- 65
- 55

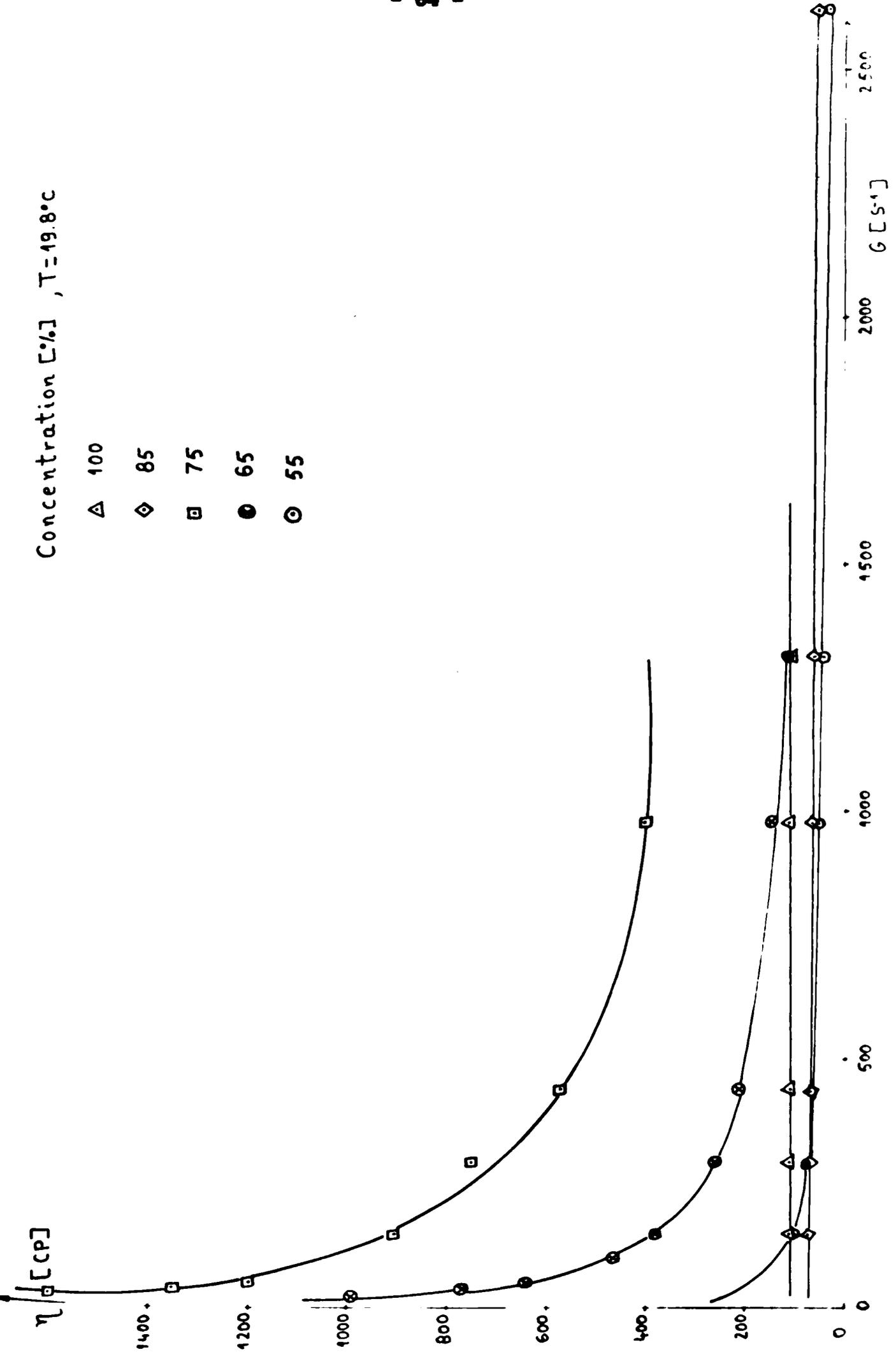


Planche 13: Evolution de la viscosité en fonction du gradient de vitesse.

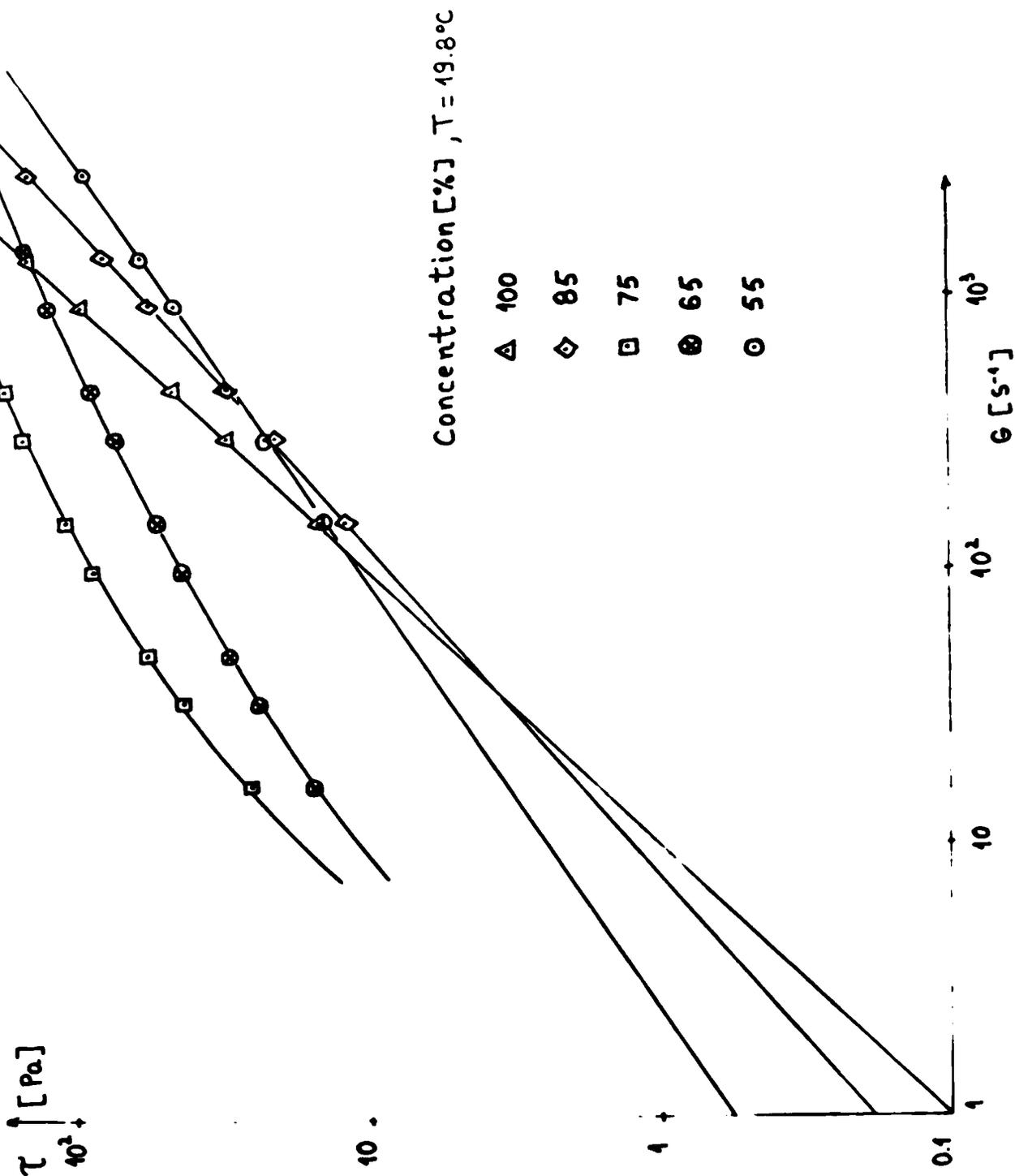


Planche 14: Rhéogramme des émulsions de «TASFALOUT».

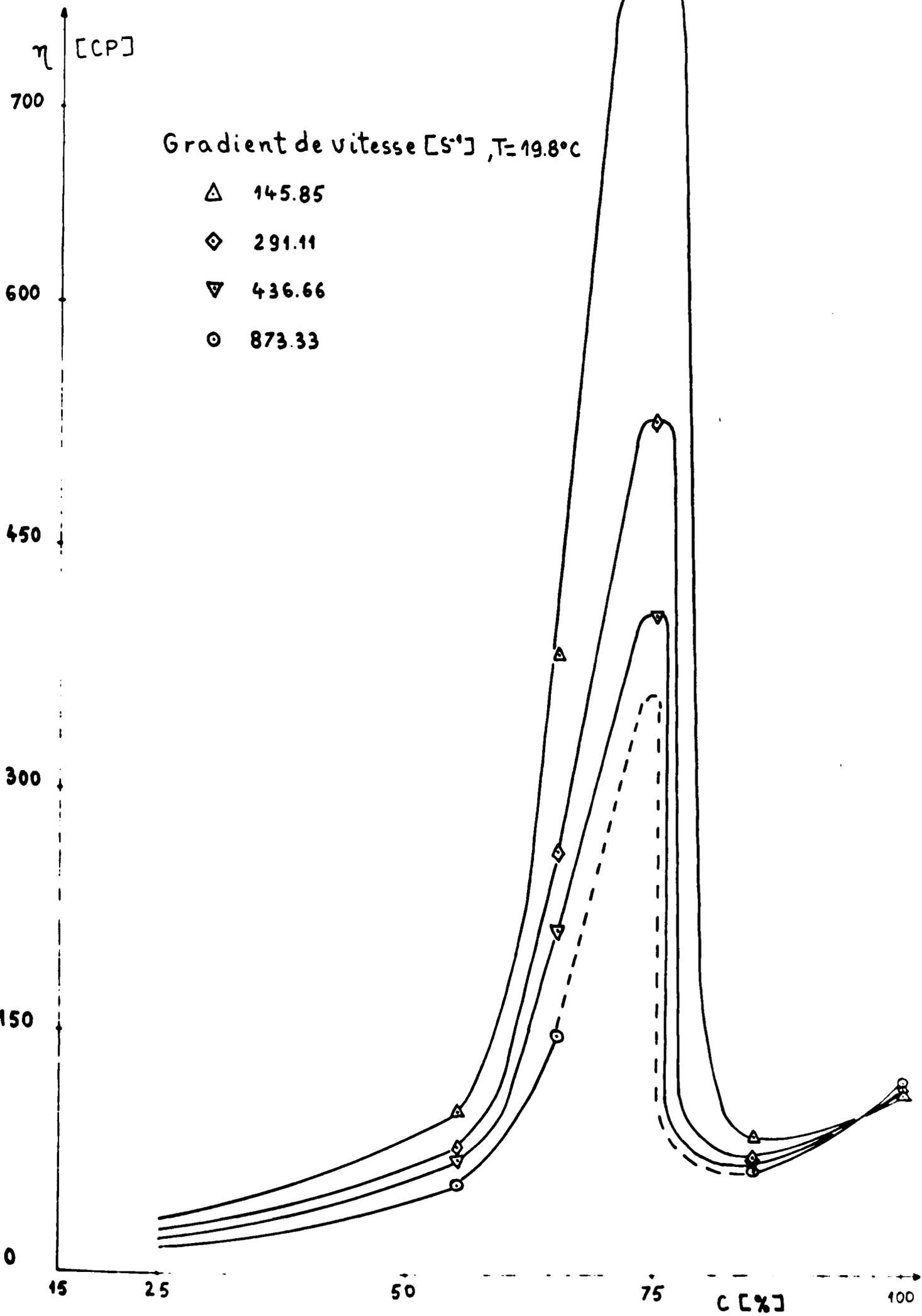


Planche 15: Influence de la Concentration.

/// HAPITRE -III-

///) /) _ESURE DE /// ERTE DE /// HARGE

1. MESURES EFFECTUEES A L'USTO.

1.1. ETUDE ET REALISATION DE L'INSTALLATION.

Nos premiers essais, dans l'étude de la perte de charge, étaient réalisés sur une installation qui existait dans laboratoire de mécanique des fluides, de conception hongroise et qui était programmée, Comme un travail pratique pour les étudiants en graduation. Il s'avérait; que cette installation ne répondait pas complètement à nos besoins, c'est pourquoi, on était amené à la modifier en grande partie, pour aboutir à une installation (planche IV) qui se compose, principalement des élément suivants:

- La conduite (I): est en acier entamé (trempé dans un bain d'étain)
 - Sa rugosité intérieure été mesurée, en collaboration avec Monsieur POPESCU, professeur en métrologie. La mesure en plusieurs sections et en plusieurs points d'une section, nous a permis de déterminer une valeur moyenne de rugosité qui est de 87 microns.
 - Son épaisseur est de 2.8 millimètres.
 - Le diamètre a été mesuré au moyen d'un pied à coulisse, est de 21 millimètres, avec une précision de 1/10 de millimètres.
 - La longueur entre les deux prises de pression a été mesurée au moyen d'une règle graduée, est de 5 mètres avec une précision de 2 Millimètres, Cette longueur correspond à une longueur de perte de charge de 238 fois le diamètre.
- En amont de la portion de mesure, on dispose d'une longueur d'entrée de 1 metre, ce qui correspond à 47.6 fois le diamètre. Cette longueur est suffisante pour avoir l'établissement du régime. En aval, la longueur débouchée est de 0.5 mètres. Dans tous les régimes d'écoulement utilisés dans l'expérience, la conduite se comportait comme hydrauliquement lisse. La relation $K_s \cdot U/V$, a été toujours vérifiée.

- DEUX BACS DE MESURE DE DEBIT (2) et (3).

Le bac (2) est utilisé pour la mesure des faibles débits; notamment en régime laminaire. Son coefficient de cubage est de 0.0491 litres par millimètre. Le bac (3) est utilisé pour la mesure des débits assez élevés; ce qui correspond généralement au régime turbulent. Son coefficient de cubage est de 0.1344 litres par millimètre. Leur hauteur était suffisante pour avoir un temps de mesure de débit de 2 minutes.

- Le réservoir (4): Il est placé en aval de la conduite. C'est le réservoir principal ; il sert à alimenter le réservoir (5) et aussi, utilisé pour la préparation des concentrations de l'émulsion de »TASFALOUT« . Son diamètre est de l'ordre de 82.7 cm.
- Le réservoir (5): De capacité de 200 litres; il sert à alimenter la conduite, sous l'effet du champ de pesanteur. Le fluide qu'il contient est en contact avec la pression atmosphérique et son niveau est d'une hauteur de 2.50 mètres par rapport à l'axe de la conduite.
- DEUX POMPES CENTRIFUGES (6): sont placées en parallèle et servent à refouler le fluide du réservoir (4) au réservoir(5). La hauteur de chacune est de 25 mètres d'eau.
- Le Régulateur de niveau (7): Il est fixé au réservoir (5) et lié aux pompes pour la commande du refoulement du fluide; afin de maintenir le niveau constant dans le réservoir (4); ce qui permettrait d'assurer un écoulement permanent dans la conduite. L'inertie du flotteur provoque une variation du niveau de 5mm.
- Deux manomètres en»U«(8)et (9): Le manomètre (8) est inversé et utilisé par la mesure des faibles différences de pression. Le manomètre (9) est à mercure et utilisé pour la mesure des fortes différences de pressions et particulièrement; lorsque la capacité du manomètre inversé ne sera plus suffisante.
- Deux prises de pression (10) et (11): Leurs diamètres extérieurs et intérieurs, sont respectivement de 8mm. et de 6mm. Elles sont munies chacune de deux orifices; afin de communiquer avec les manomètres (8) et (9).
- Cinq (5) robinets d'arrêt (12), (13), (14), (15), (16):
Le robinet (12), sert à régler le débit qui circule dans la conduite (1).
Les autres robinets servent; soit à fermer ou à ouvrir le circuit dans les sens convenable, au besoin de la mesure.

La connection des différents élément est assurée, soit par des pièces rigides (manchots) lorsqu'il s'agit de réunir deux éléments de diamètre différents ou par des tubes plastiques assez rigides. Ces derniers sont utilisés; afin d'amortir les vibrations subis par la conduite, de la part des pompes.

La connection entre le réservoir (4) et (5) est assurée par un tuyau ordinaire en plastique, son diamètre est de 20 millimètres.

Les prises de pression utilisées, étaient disponibles dans le laboratoire de mécanique des fluides et elles sont de conception HONGROISE. Leur diamètre intérieur de 6 millimètre est jugé assez grand pour avoir une mesure précise. Hélas! les moyens disponible ne nous permettent pas de confectionner des prises de plus faible dimension. Le logement de ces prises était réalisé en effectuant: en premier; un centrage, suivit d'un avant trou de 4 mm et finalement, terminé par un perçage de 8 mm.

Par manque de collage adéquat; on avait recours, pour la fixation des prises, à la soudure à l'arc; dont l'inconvénient majeur, est la déformation de la conduite dans la zone de la prise; ce qui pourrait engendrer des mesures de pression statique erronnées.

Les précautions nécessaires, ont été prises; afin d'éliminer les bavures qui pourraient subsister après le perçage.

1.2. METHODES DE MESURE:

a- MESURE DE LA VITESSE.

Le paramètre vitesse; qui intervient dans l'expression du coefficient de perte de charge, est calculé à partir du débit mesuré et à partir de la section de la conduite.

En régime laminaire; le débit est mesuré au moyen du bac (2), en ouvrant le robinet (15) et en fermant les robinets (13) et (16). Alors; qu'en régime turbulent, le débit est mesuré au moyen du bac (3); en ouvrant le robinet (13) et en fermant les robinets (14) et (15).

La mesure de débit, se traduit par la mesure du temps qui correspond à une hauteur donnée de remplissage du bac de mesure. Alors; le débit est:

$$Q = K_c \cdot \frac{H}{t}$$

K_c : Coefficient de cubage

H : Hauteur de remplissage du bac

t : Temps de remplissage correspondant à la hauteur H

La hauteur (H) est relevée au moyen d'une règle graduée; dont la précision est de 0.5 millimètre.

Le temps (t) est déterminé au moyen d'un chronomètre avec une précision au 1/10 de seconde.

Précision sur la vitesse: $U_m = \frac{4 Q}{\pi D^2} = \frac{4 K_c H}{\pi D^2 t}$

$$\frac{\delta U_m}{U_m} = \frac{\delta H}{H} + 2 \frac{\delta D}{D} + \frac{\delta t}{t} = \frac{0.5}{80} + 2 \frac{0.1}{21} + \frac{0.1}{50} = 1.8 \%$$

Précision sur le nombre de Reynolds: $Re = \frac{U_m D}{\nu} \rho$

$$\frac{\delta Re}{Re} = \frac{\delta U_m}{U_m} + \frac{\delta D}{D} + \frac{\delta \nu}{\nu} = 1.8 + \frac{0.1}{21} + 10 = 11.8 \%$$

On suppose que: $\frac{\delta \rho}{\rho} = 0$ et $\frac{\delta \nu}{\nu} = 10\%$.

H et t: sont prises comme valeurs moyennes de mesures.

b- MESURE DE LA PRESSION;

La mesure de la différence de pression, correspond à la mesure de la dénivellation des colonnes d'eau dans le manomètre (8) ou, la dénivellation des colonnes de mercure dans le manomètre (9)

Precision sur la mesure de la pression statique:

Manomètre (8):

$$\Delta P = \rho_e g \Delta H \longrightarrow \frac{\delta \Delta P}{\Delta P} = \frac{\delta \Delta H}{\Delta H} = \frac{2}{200} = 1\%$$

Manomètre (9):

$$\Delta P = (\rho_m - \rho_e) g \Delta H \longrightarrow \frac{\delta \Delta P}{\Delta P} = \frac{\delta \Delta H}{\Delta H} = 1\%$$

Precision sur la mesure du coefficient de perte de charge .

$$\lambda = \frac{2 \Delta P D}{\Delta L \rho U_m^2} \longrightarrow \frac{\delta \lambda}{\lambda} = \frac{\delta \Delta P}{\Delta P} + \frac{\delta \Delta L}{\Delta L} + \frac{\delta D}{D} + 2 \frac{\delta U_m}{U_m}$$

$$= 1 + \frac{2}{5000} + \frac{0.1}{21} + 2 \times 1.8 = 4.6\%$$

3- RESULTATS EXPERIMENTAUX

a- ECOULEMENT DE L'EAU: La vitesse maximum atteinte dans notre installation, par l'effet de gravitation est de 1.8 m/s; ce qui correspond à un nombre de Reynolds égal à 22000. Dans la représentation logarithmique de l'évolution du coefficient de perte de charge en fonction du nombre de Reynolds (planche 1):

On peut remarquer, une allure assez régulière des points de mesure, qui sont décalés par rapport à la courbe universelle de PRANDTL-VON KARMAN et le décalage devient plus importance pour les nombres de Reynolds les plus grands. Alors; que dans la représentation logarithmique de la perte de charge en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement (planche 2), on obtient en régime laminaire une droite de pente 1.22 au lieu de 1 (POISEUILLE) et en régime turbulent une droite de pente 1.86 au lieu de 1.75 (BLASIUS).

On peut aussi; envisager que des bavures ont subsister malgré que les précautions nécessaires ont été prises à cet égard.

b- ÉCOULEMENT DE L'EMULSION DE »TASFALOUT « .

Les différentes concentration ont des viscosités, qui sont relativement assez grandes et de ce fait, les régimes d'écoulement obtenus dans le système d'écoulement par gravitation, sont en grande partie des régimes laminaires. A priori; on peut évaluer les régimes d'écoulement maximum correspond aux concentrations de comportement newtonien.

$$\text{Concentration à 50\%: } Re_{50} = Re_0 \frac{\mu_0}{\mu_{50}} \frac{\rho_{50}}{\rho_0} = 22000 \frac{113}{9} 0.97 = 2679.3$$

$$\text{Concentration à 32.4\% } Re_{32.4} = Re_0 \frac{\mu_0}{\mu_{32.4}} \frac{\rho_{32.4}}{\rho_0} = 22000 \frac{113}{5} 0.975 = 4847.7$$

$$\text{Concentration à 26.6\%: } Re_{26.6} = Re_0 \frac{\mu_0}{\mu_{26.6}} \frac{\rho_{26.6}}{\rho_0} = 22000 \frac{113}{4.5} 0.977 = 5397.4$$

Re , μ , ρ ; sont respectivement: le nombre de Reynolds, La viscosité dynamique et la masse volumique qui correspondent à la concentration t en pour cent, avec $t = 0$, pour le cas de l'eau et $\rho_0 = 1000 \text{ kg / m}^3$.

Les régimes d'écoulement maximum déterminés ci-avant, montrent que pour le cas de l'émulsion de »TASFALOUT « , le système d'écoulement par gravitation s'avère insuffisant pour une étude complète et objective de la perte de charge en écoulement turbulent. De ce fait; on s'est vu obligé de nous en passer de ce système, en éliminant le réservoir (5) et en faisant écouler l'émulsion, directement au moyen des deux pompes centrifuges.

L'inconvénient majeur de ce dernier moyen est la perturbation de l'écoulement d'une part et la variation du niveau du fluide dans le réservoir (4) d'autre part, lors de la mesure de débit.

L'inconvénient signalé, ci-avant est confirmé en grande partie par les résultats graphiques des planches: 3,5 et 7.

On peut remarquer; que les points de mesures sont relativement assez dispersés et ne coïncident, même pas avec la courbe universelle de Poiseuille. Si, on considère les points de mesure obtenus avec l'eau, comme résultat de référence, on peut conclure, que l'écoulement de l'émulsion de «TASFALOUT» en conduite, provoque une réduction de perte de charge qui est proportionnelle à la concentration en huile. Cette conclusion, pourrait être considérée comme un peu prématurée, vu l'imprécision relativement importante fournie par notre installation. Néanmoins; ce résultat qui paraît être intéressant, mérite une vérification ultérieure, sur une installation et avec des moyens plus appropriés. Toute-fois, on peut ajouter les résultats obtenus dans les planches: 4,6 et 8: où on peut voir, qu'en régime laminaire, on a des droites dont la pente est inversement proportionnelle à la concentration et qu'en régime turbulent, on a des droites dont la pente est presque constante pour les différentes concentrations de l'émulsion de «TASFALOUT».

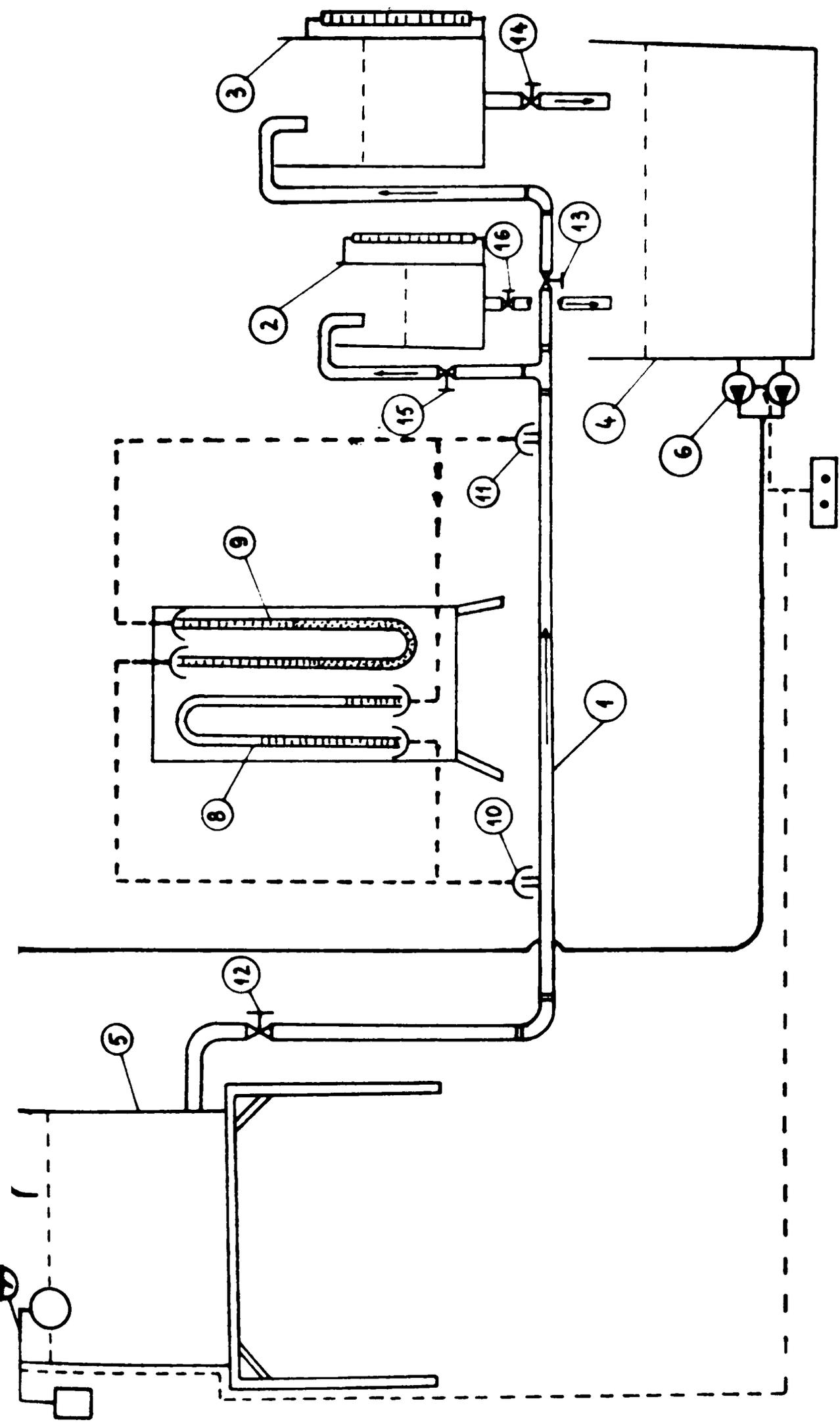


PLANCHE IV : Schéma de l'installation hydraulique.

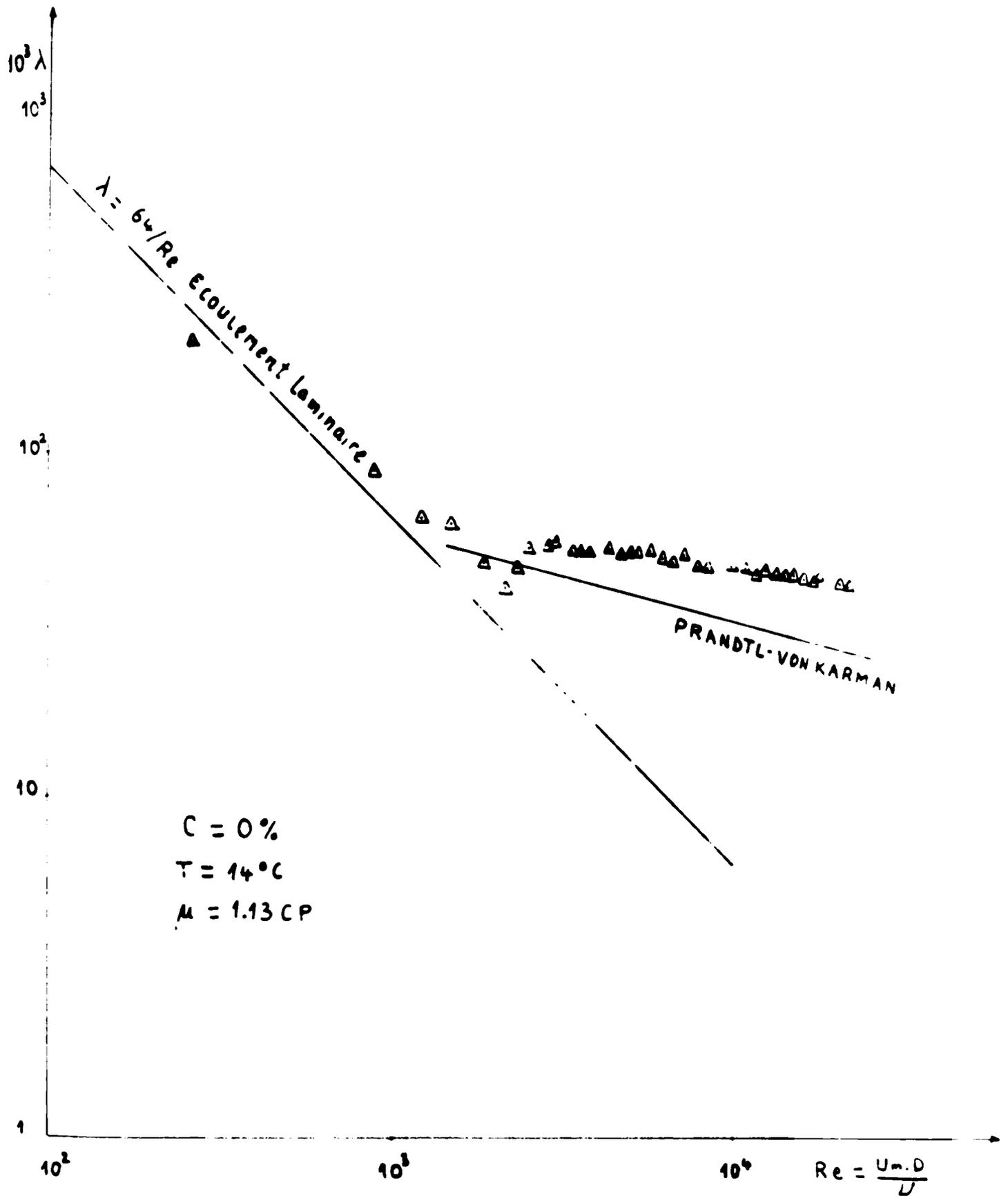


Planche 1: Evolution du Coefficient de perte de charge en fonction du nombre de Reynolds pour de l'eau.

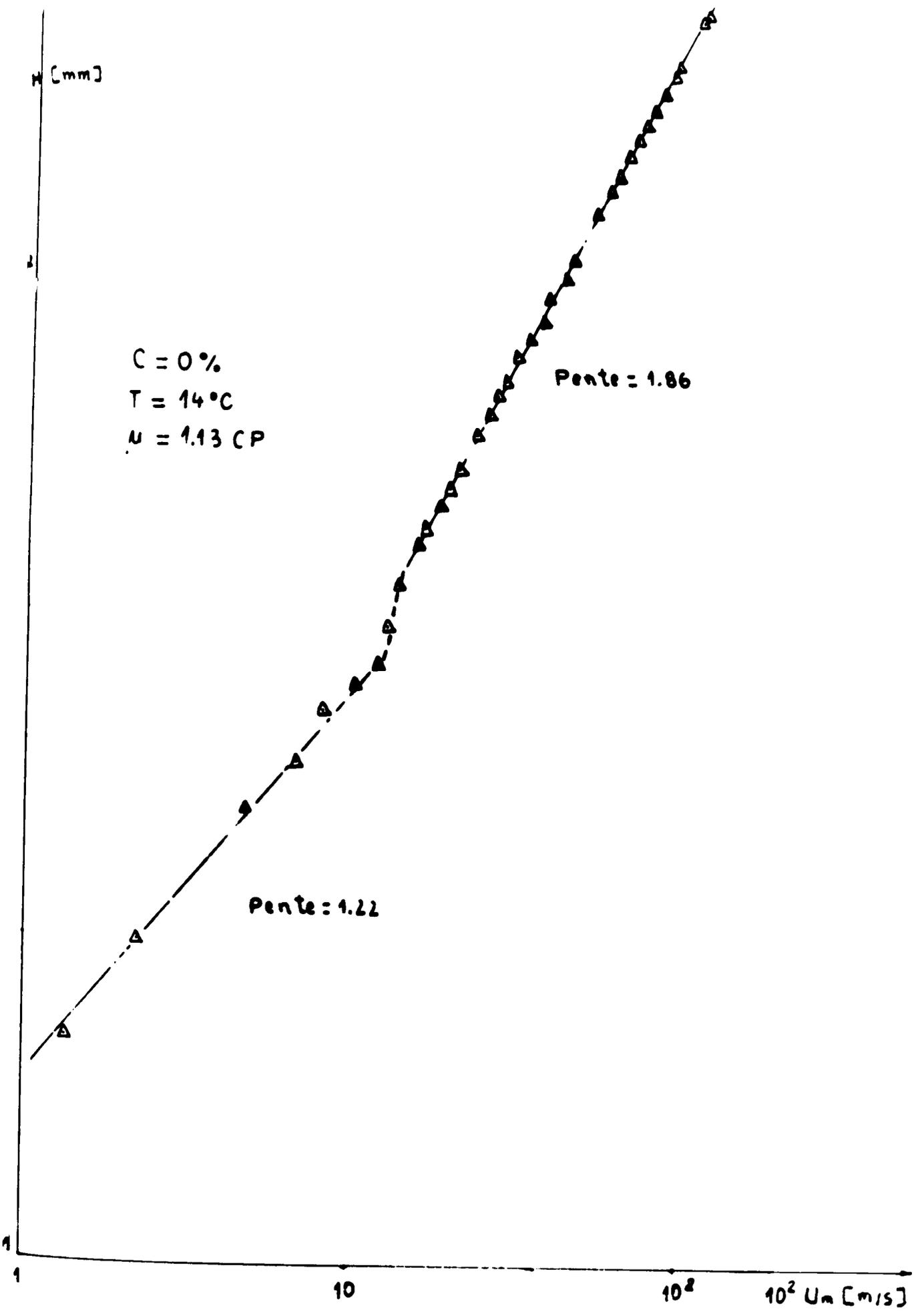


Planche 2: Evolution de la perte de charge pour de l'eau

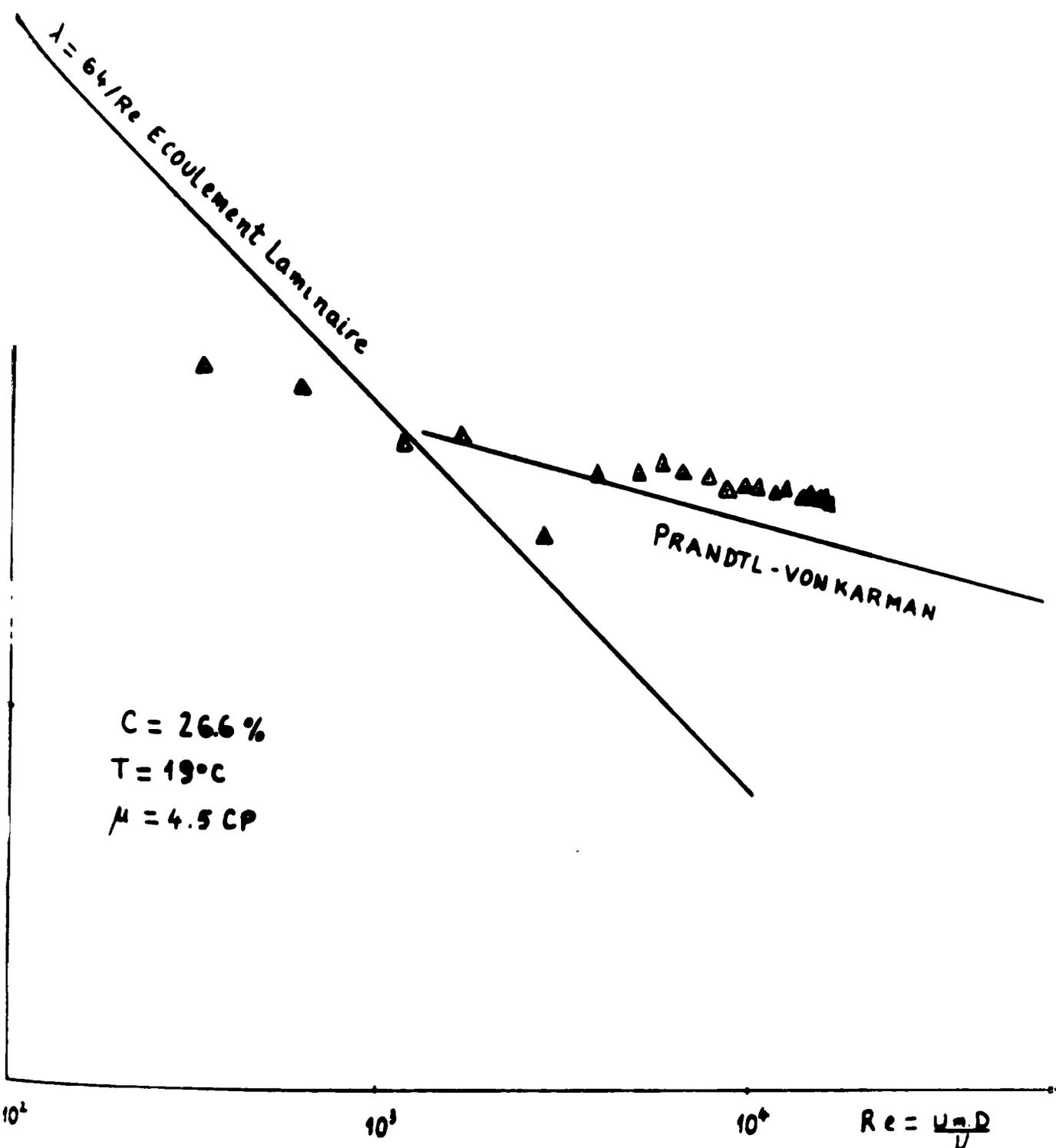


PLANCHE 3 : Evolution du Coefficient de perte de charge en Fonction de Reynolds pour l'emulsion de »TASFALOUT«.

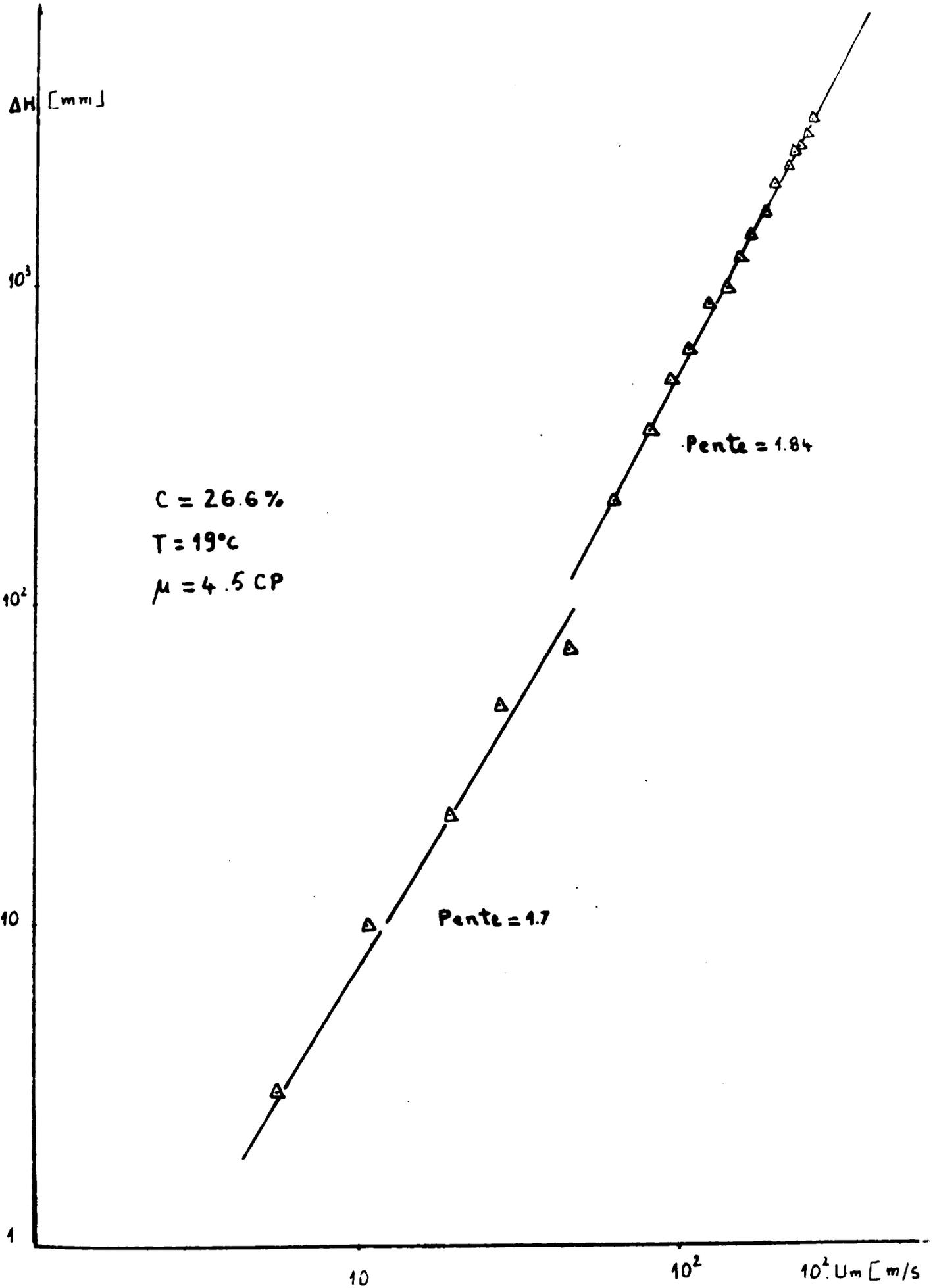


planche 4 : Evolution de la perte de charge pour l'emulsion de
>> TASFALOUT << .

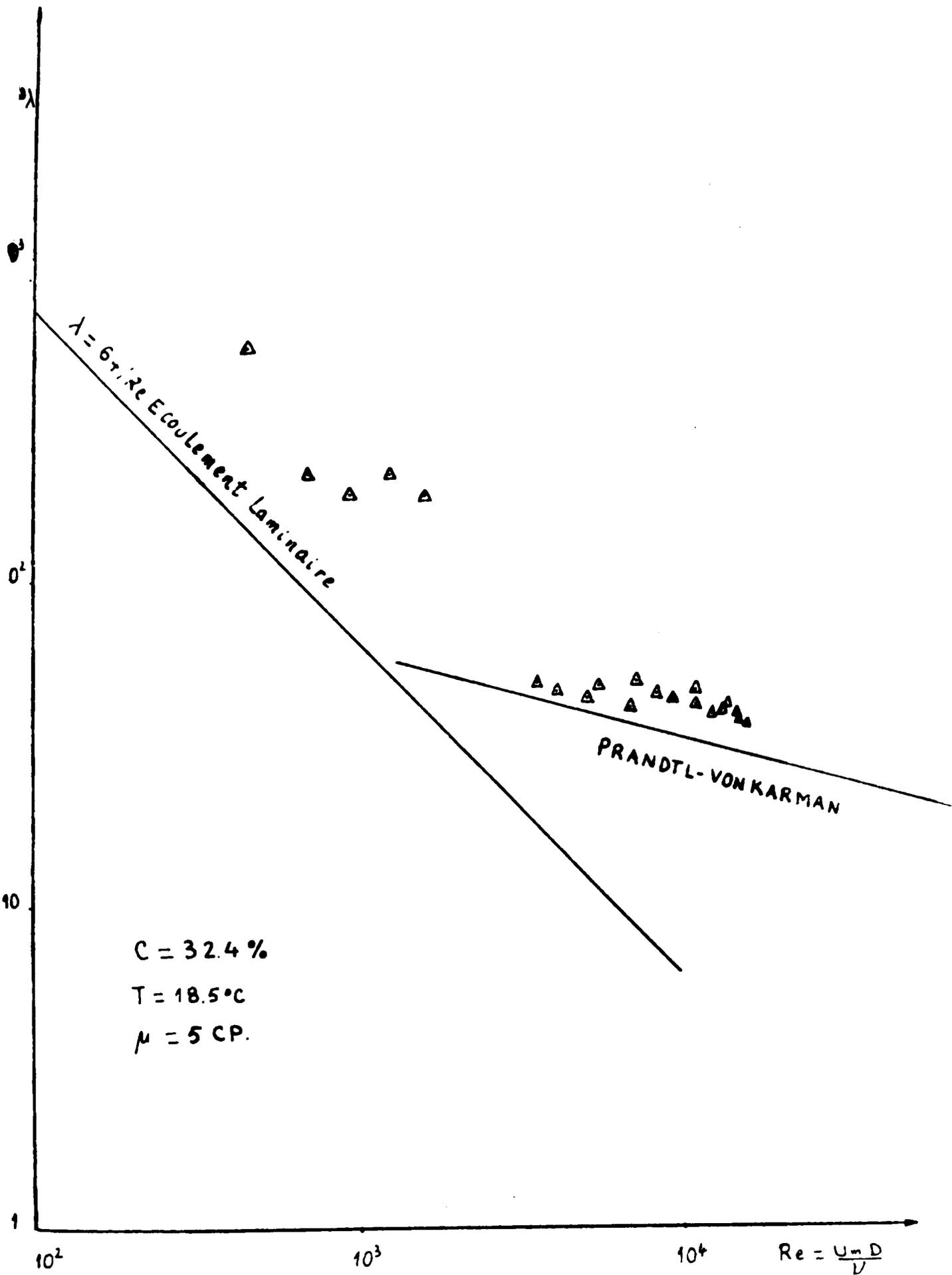


PLANCHE 5 : Evolution du coefficient de perte de charge en fonction du nombre de Reynolds pour l'emulsion de »TASFALOUT«.

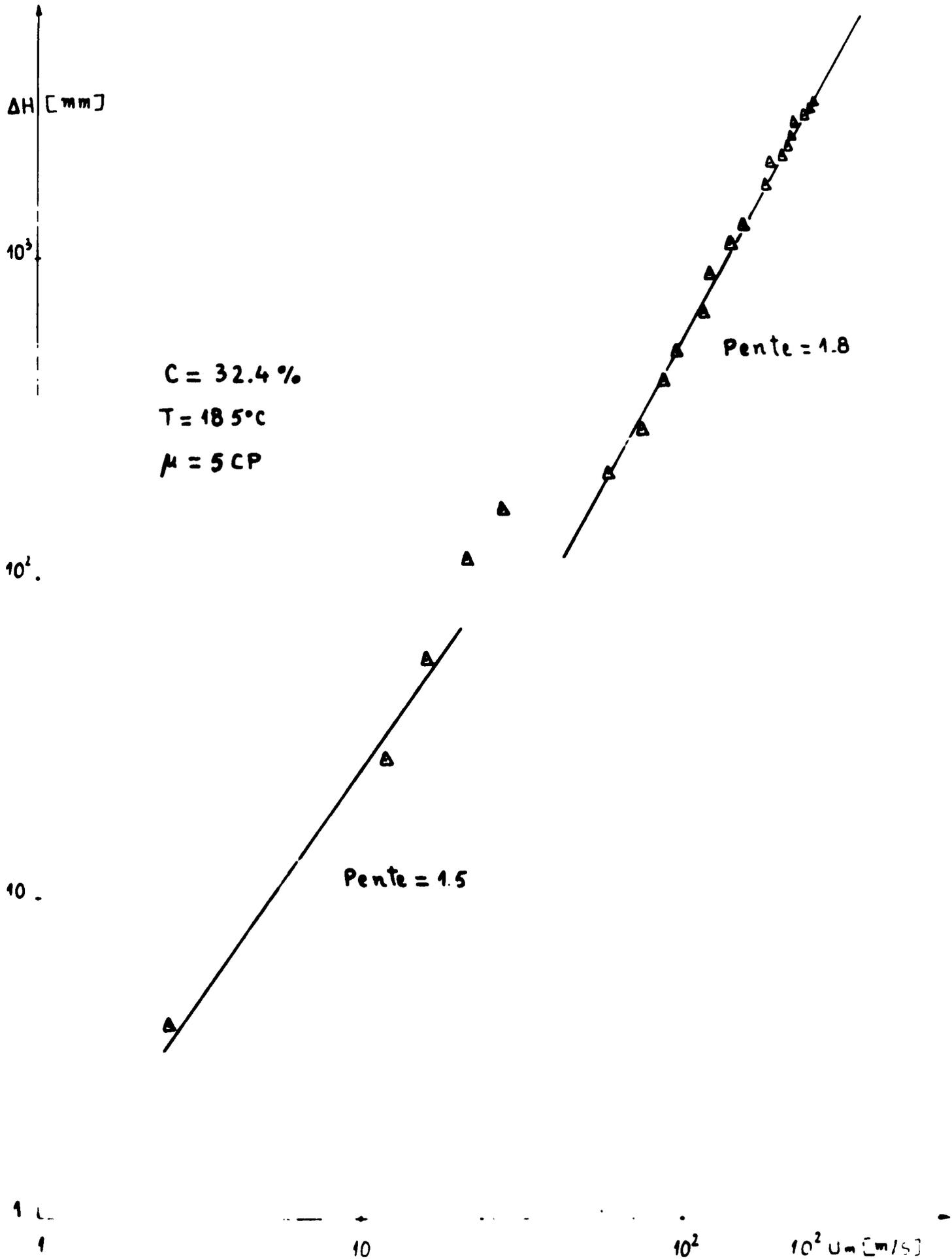


PLANCHE 6 : Evolution de la perte de charge pour l'émulsion de «TASFALOUT» .

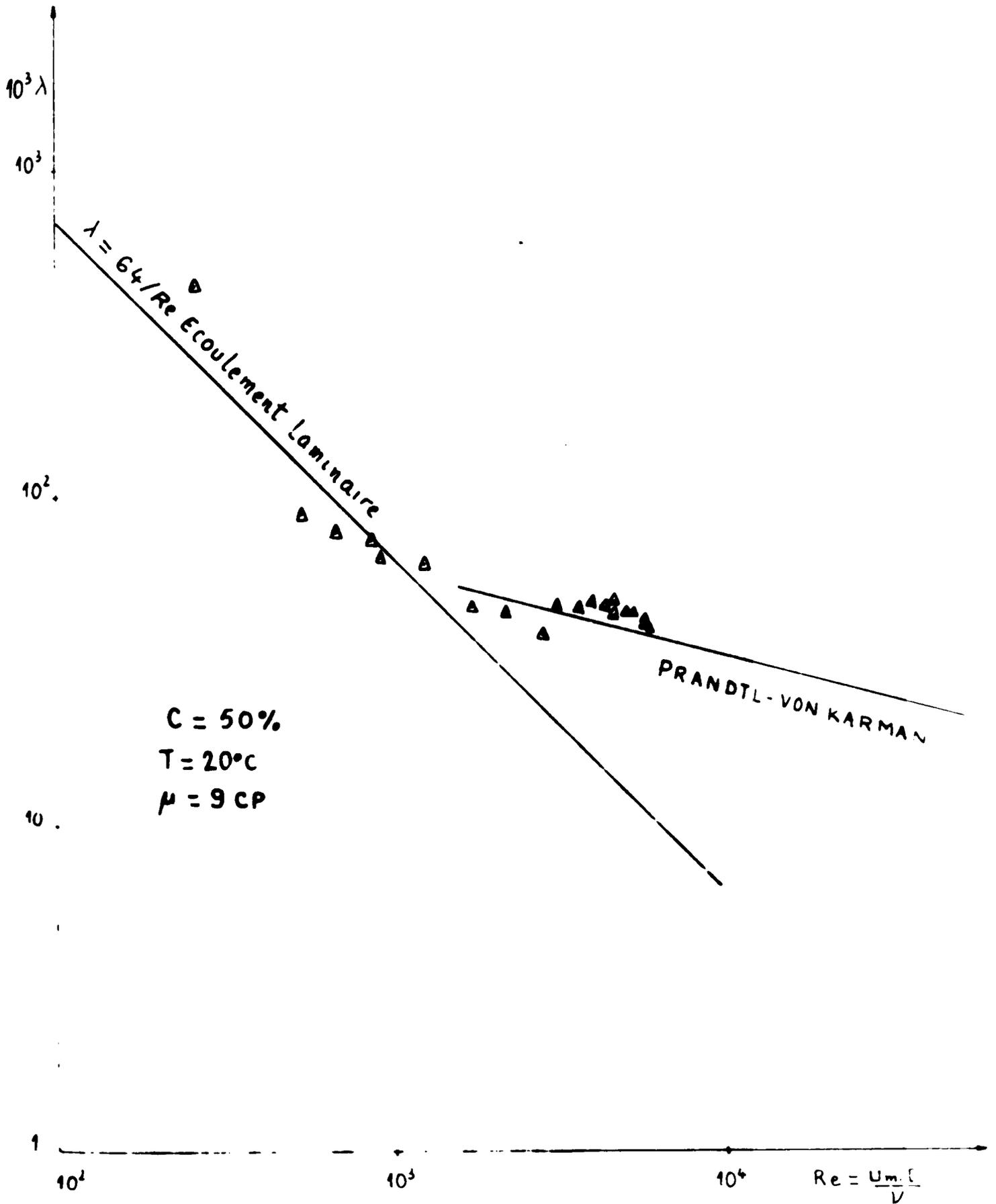


PLANCHE 7 : Evolution du coefficient de perte de charge en fonction du nombre de Reynolds pour l'émulsion de »TASFALOUT« .

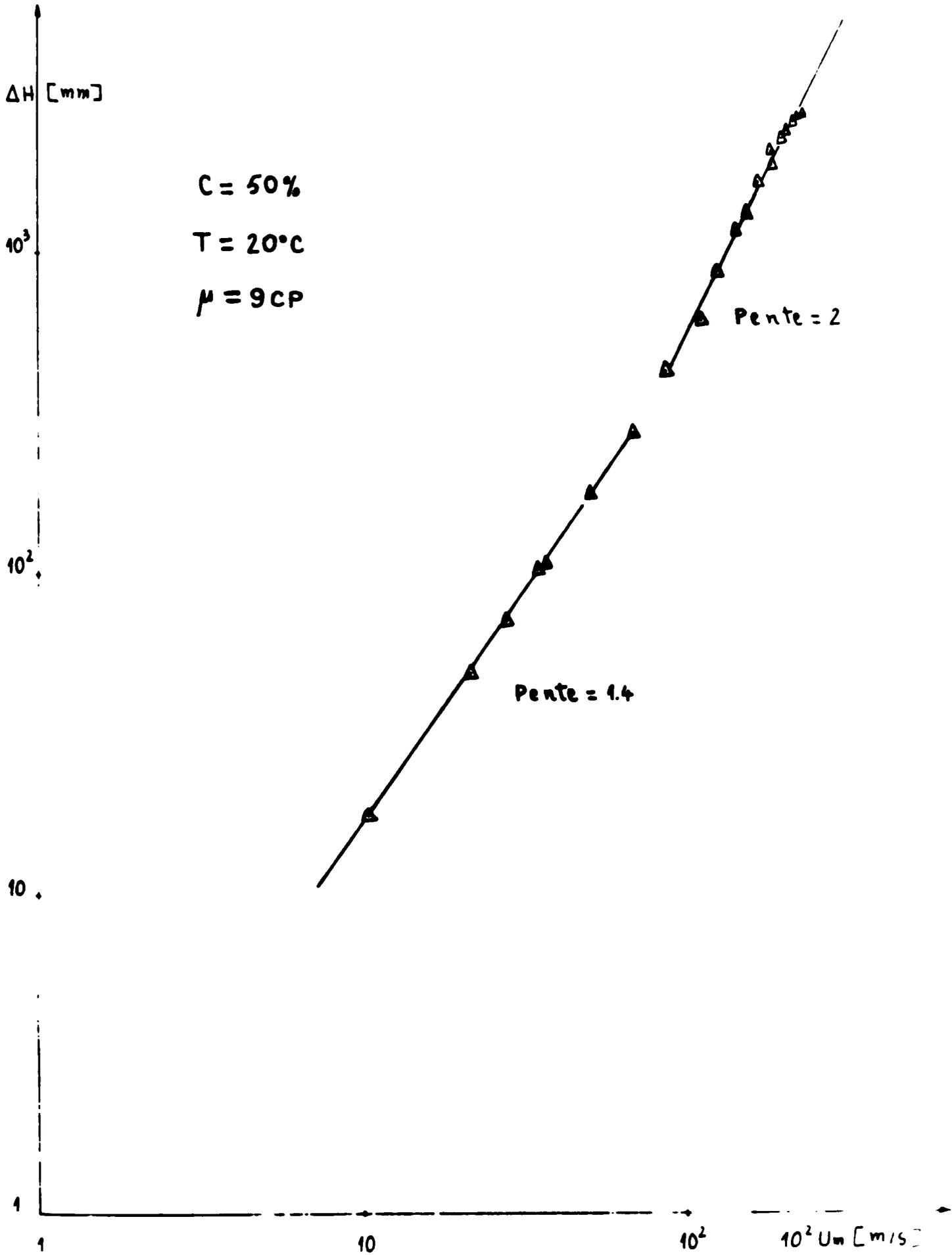


PLANCHE 8: Evolution de la perte de charge de l'émulsion de «TASFALOU»

2- MESURES EFFECTUEES A L'IMFS.

2-1 PERTE DE CHARGE DANS LES CAPILLAIRES.

2-2-1 DESCRIPTION DE L'INSTALLATION.

- RHEOMETRE (PLANCHE V)

L'appareil utilisé a été réalisé à l'institut de Mécanique de Fluide de STRASBOURG, en collaboration avec le Professeur SELLIN.

Il comporte principalement une série de capillaires métalliques interchangeables, dont les diamètres varient entre 1 et 3mm et la longueur entre 500 et 1000 fois le diamètre. La solution est poussé dans le capillaire au moyen d'un piston qui est actionné par une pression d'air ou d'azote comprimé. Une came entraînée par le piston, commande un microrupteur qui permet la détermination du temps d'écoulement d'un volume correspondant au déplacement du piston. Le système est prévu pour permettre la mise en régime avant le déclenchement du microrupteur.

- DISPOSITIF D'ALIMENTATION ET DE REGULATION DE LA PRESSION (PLANCHE VI).

L'alimentation en gaz sous pression, a été réalisée à partir d'une bouteille d'azote comprimée, ou du réseau d'air pour les tests à basse pression. La régulation est assurée par des circuits à basse et haute pression; stabilisés par des vannes à fuite. L'entrée d'air dans le rhéomètre est assurée par une électrovanne.

2.2 DEPOUILLEMENT DES MESURES.

Le dépouillement des mesures a été effectué par le calcul sur un micro-ordinateur HP- 9630.

La vitesse moyenne est calculée à partir de la mesure du temps d'écoulement correspondant au volume déplacé.

$$U_m = \frac{X \cdot k}{t}$$

Avec; X : Parcours du piston

$$k = \left(\frac{D}{d}\right)^2$$

D : Diamètre du cylindre

d : Diamètre du capillaire

t : Temps d'écoulement

On déduit le nombre de Reynolds relatif au solvant : $Re = \frac{U_m \cdot d}{\nu}$

avec ; ν : Viscosité cinématique du solvant.

. Coefficient de perte de charge linéaire - λ .

La perte de charge est donnée par la relation suivante:

$$\Delta H = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{U_m^2}{2g} + K \cdot \frac{U_m^2}{2g}$$

qui est la somme de la perte de charge linéaire dans le capillaire et la perte de charge singulière due aux conditions d'entrée et la mise en régime.

K: Coefficient de perte de charge singulière égal à:
1; pour les mesures avec les solutions du Polyox.

0,5; pour les mesures avec les émulsions de TASFALOUT

0,75; pour les mesures avec les émulsions de pétrole.

Finalement; on peut aboutir à :

$$\lambda = \frac{d}{L} \left[\frac{2}{U_m^2} \left(\frac{P}{\rho} + gL \right) - K \right]$$

$$\text{Avec: } \Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta H = P + \rho \cdot g \cdot L$$

P: Pression indiquée par le manomètre.

. Contrainte de cisaillement à la paroi :

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot U_m^2$$

. Vitesse de frottement:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda U_m^2}{8}}$$

. Coefficient de réduction de frottement:

$$D.R = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} \cdot 100$$

Coefficient de perte de charge de la solution.

: Coefficient de perte de charge du solvant.

2-1-2- RESULTATS EXPERIMENTAUX.

a- ESSAIS AVEC DES SOLUTIONS DE POLYOX 301: (PLANCHE9)

Les mesures de perte de charge en capillaire, de plusieurs concentrations de polyox, ont révélé les deux caractéristiques principales de ce type de polymère.

- Une forte réduction de frottement pour les solutions diluées (concentration inférieure à 300 PPM). La réduction maximale est obtenue avec une contraction de 25 PPM. Ce qui explique, l'existence d'un seuil de concentration à partir duquel, l'effet de réduction du polymère devient moins efficace. (PPM= Partie par MILLION).

- Une dégradation rapide, pour les gradients de cisaillement

relativement élevés. On observe l'effet de dégradation à partir d'un nombre de Reynolds de l'ordre de 25000, où la réduction de frottement diminue.

En ce qui concerne, les solutions semi-diluées et concentrées (concentration supérieure à 300 PPM); leur comportement est plus complexe en raison de l'interaction entre les molécules qui sont assez proches les une des autres.

La viscosité de ces solutions est très sensible au changement de la vitesse de cisaillement et elle ne pourrait pas être approximée à celle du solvant.

b- ESSAIS AVEC LES EMULSIONS DE TASFALOUT ET DE PETROLE
(PLANCHES 10-11)

La première émulsion est constituée de trois composants: de l'eau, un tensio-actif et l'huile de coupe TASFALOUT. La deuxième émulsion est de même, formée de trois composants: de l'eau, un tensio-actif » CEMULSOL.NP6 « et un pétrole IRANIEN. L'écoulement en capillaire de plusieurs concentrations de ces deux émulsions, a donné des résultats assez proches.

On peut remarquer essentiellement; que pour une concentration donnée, on a réduction de perte de charge qui diminue avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement pour l'émulsion de TASFALOUT ; la réduction de frottement s'annule pour les concentrations les plus grandes à des nombres de Reynolds plus faibles.

Il faut noter que ce résultat va dans le même sens que pour les résultats trouvés à l'USTO.

Ce phénomène observé, dans l'écoulement de ces émulsions, ne peut être vérifié et expliqué qu'à partir d'une étude microscopique minutieuse, de la configuration géométrique des deux phases de l'émulsion en fonction de la vitesse de cisaillement.

On pourrait toujours envisager une étude plus complète sur la perte de charges des émulsions, en élargissant plus la gamme des vitesses de cisaillement et en faisant, même une étude sur l'écoulement des concentrations de comportement non-newtonien.

La viscosité des différentes concentrations de l'émulsion, a été mesurée au moyen du » ROTOVISKÓ « et elle a été systématiquement vérifiée à l'aide de l'équation de POSEUILLE:

$$\eta = \tau_0 \cdot \frac{d}{8U_m} = \frac{\Delta P_L}{4L} \cdot \frac{d^2}{8U_m} = \frac{d^2}{32L} \cdot \frac{\Delta P_L}{U_m}$$

Pour le capillaire utilisé:

$$\Delta R = \Delta P - \Delta P_s = P + \rho \cdot g \cdot L - \Delta P_s$$

ΔR : Perte de charge linéaire

ΔP_s : Perte de charge singulière, $\Delta R = K \cdot \rho \cdot \frac{U_m^2}{2}$

La viscosité des différentes concentrations de l'émulsion étudiée, en capillaire peut être considérée, comme quasi-Constante.

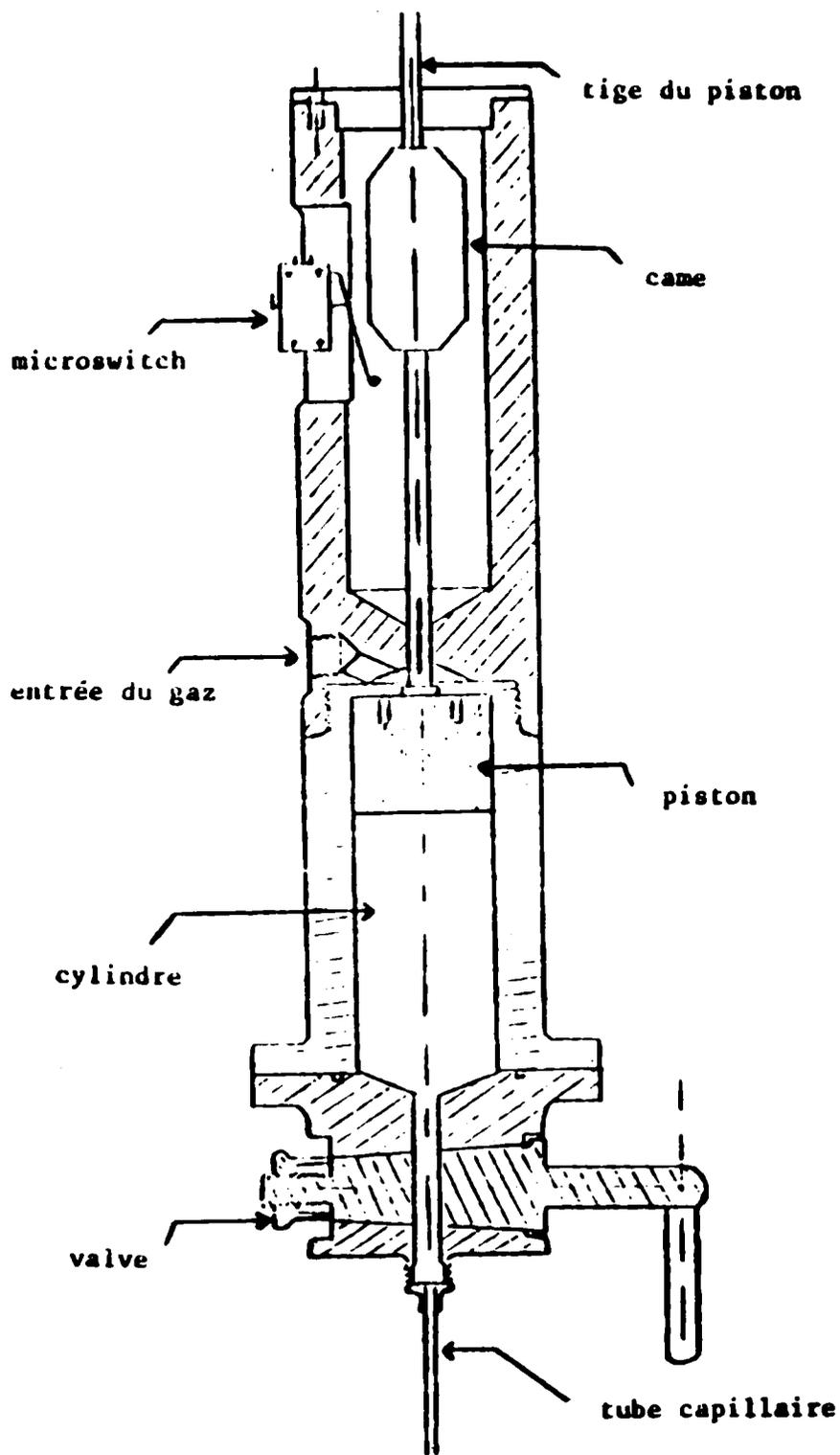


PLANCHE V: RHEOMETRE

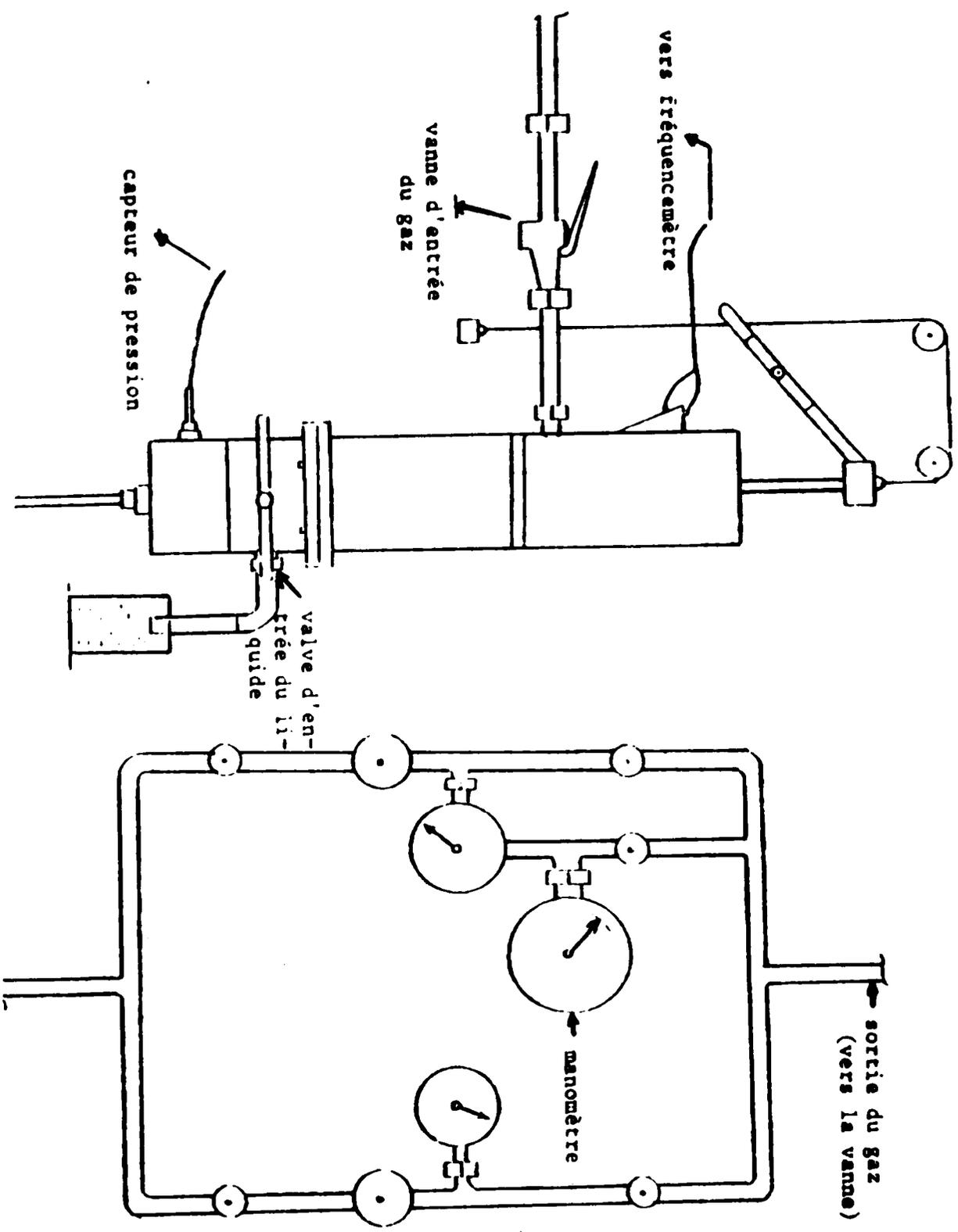


PLANCHE VI : Schéma d'Installation

capillaire. $d = 1.64 \text{ mm}$
 $L = 988.5 \text{ mm}$

Concentration [PPM]

- Δ 1000, $T = 19.5^\circ\text{C}$
- ∇ 500, $T = 17.4^\circ\text{C}$
- \square 250, $T = 19.55^\circ\text{C}$
- \diamond 50, $T = 22.4^\circ\text{C}$
- \circ 25, $T = 22^\circ\text{C}$
- \bullet eau distillée, $T = 13.65^\circ\text{C}$

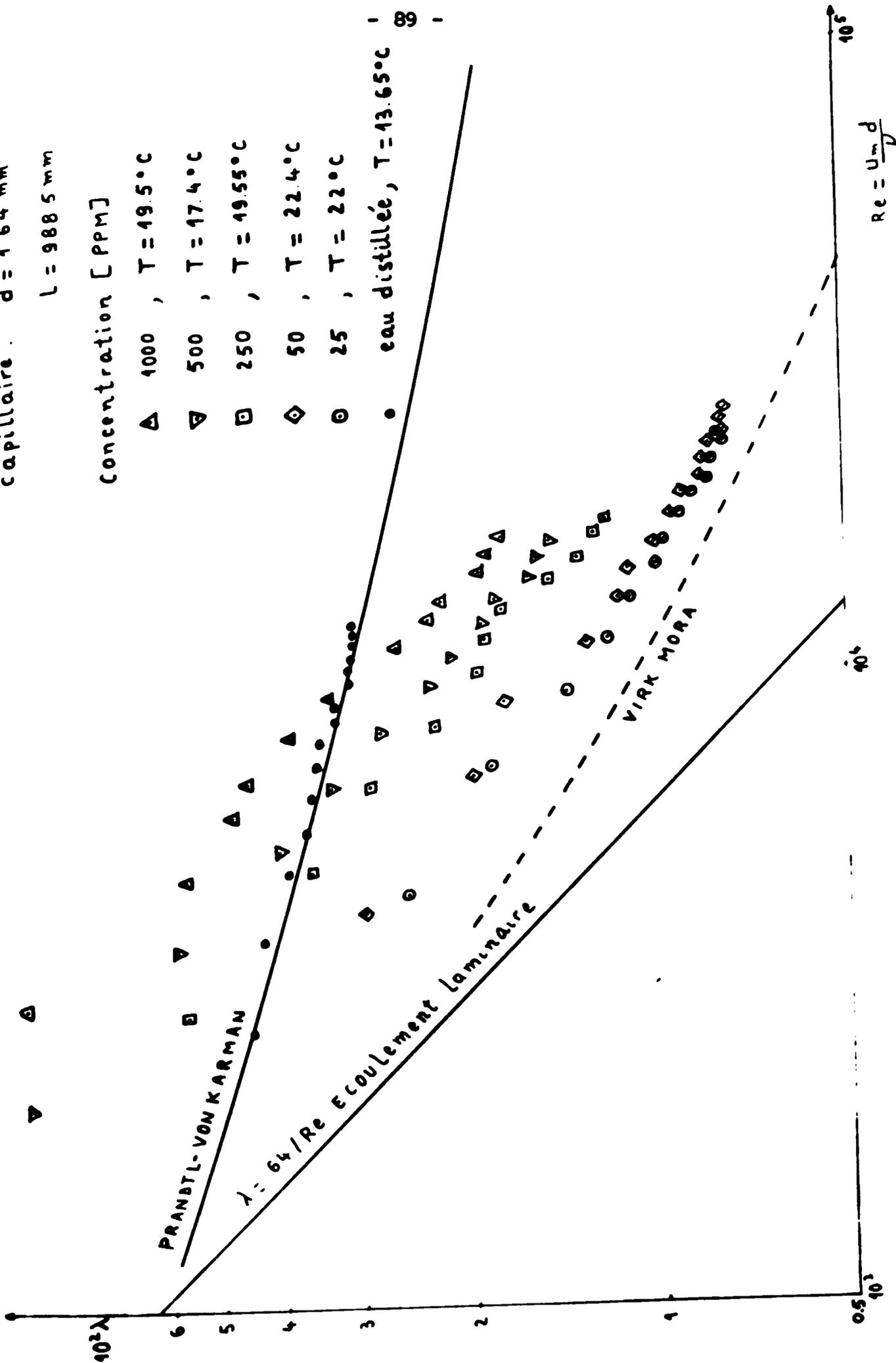


PLANCHE 9: Réduction de frottements par addition d'une Solution de POLYOX. 301.

capillaire · d = 3.56 mm
 L = 997.94 mm

• Eau distillée, T = 19.7°C
 Concentration d'huile [%]
 △ 40, T = 19.6°C
 ▽ 30, T = 19.5°C
 □ 20, T = 19.4°C
 ◇ 10, T = 18.8°C

- 90 -

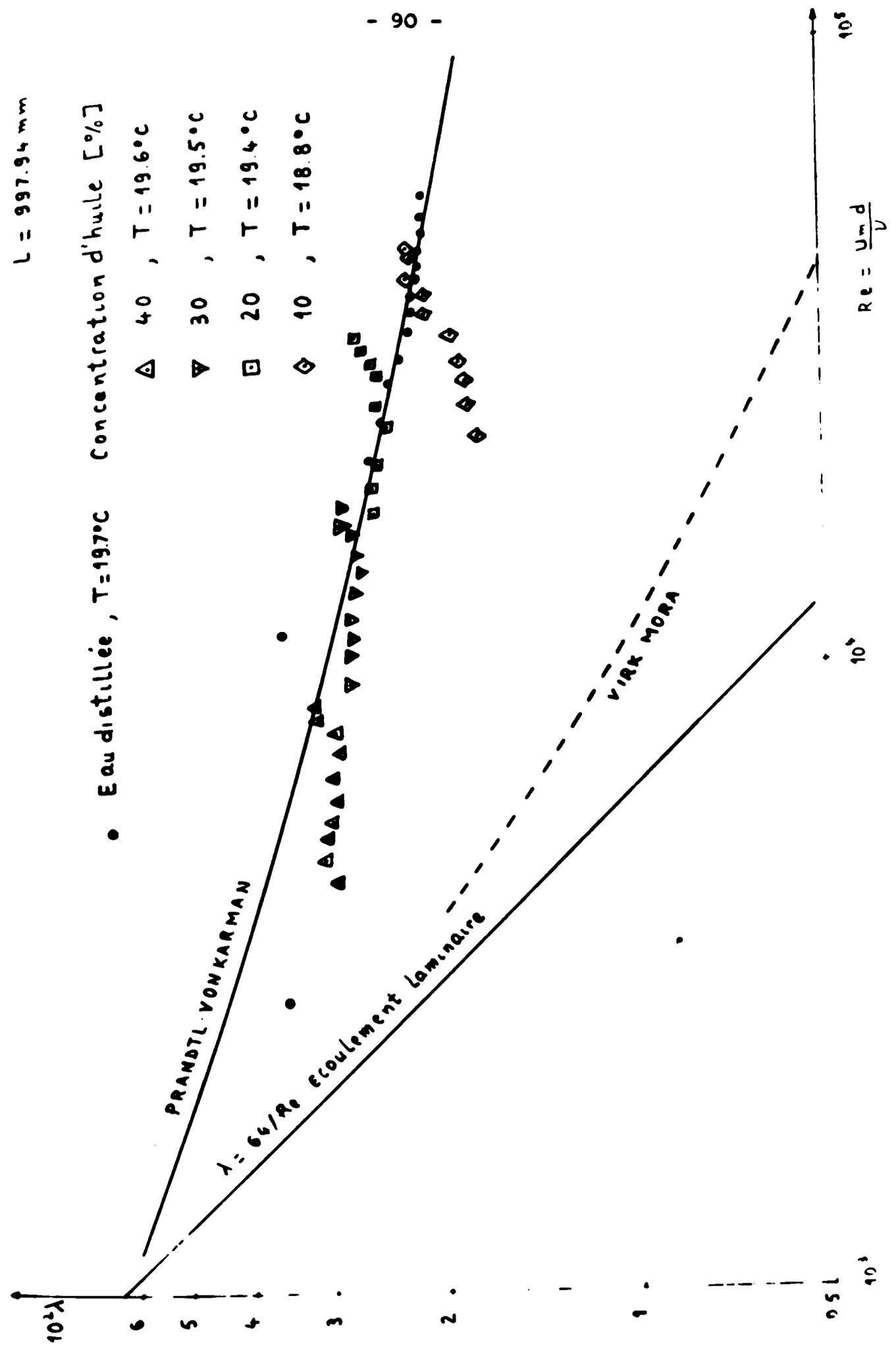


PLANCHE 10: Evolution du coefficient de perte de charge en fonction du nombre de Reynolds pour l'émulsion de »TASFALOUT« .

capillaire . $d = 3.56 \text{ mm}$

$L = 997.94 \text{ mm}$

Concentration de Pétrole [%]

Δ 65 , $T = 20.4^\circ\text{C}$

∇ 60 , $T = 20.8^\circ\text{C}$

\square 55 , $T = 20.6^\circ\text{C}$

\diamond 50 , $T = 20.9^\circ\text{C}$

\bullet eau distillée , $T = 19.4^\circ\text{C}$

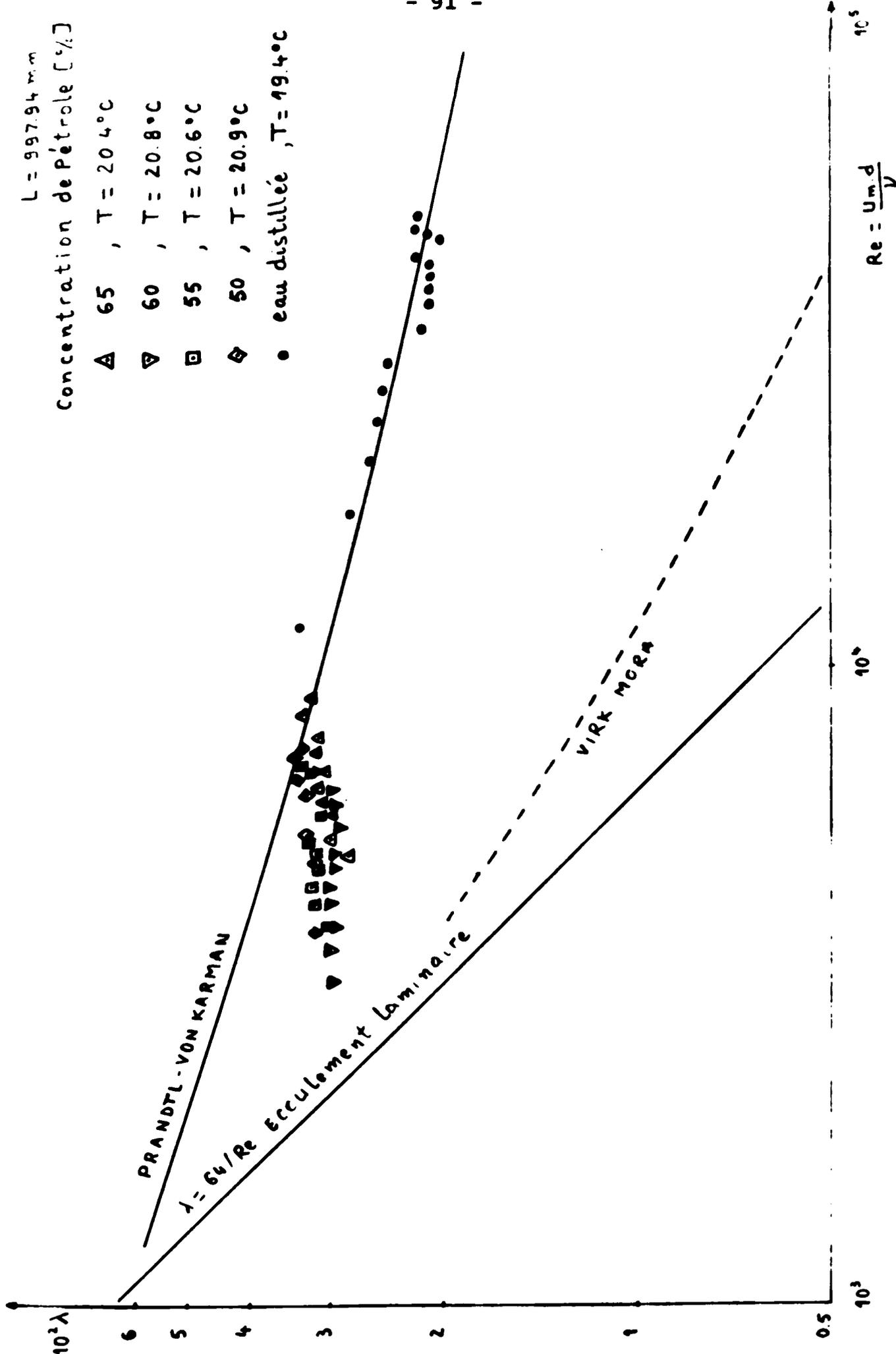


PLANCHE 11: Evolution du coefficient de perte de charge en fonction du nombre de Reynolds pour l'emulsion de pétrole.

2.2 PERTE DE CHARGE EN CONDUITE.

2.2.1. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION (PLANCHE VII).

L'installation expérimentale, comporte trois principales:

- un dispositif d'alimentation en eau ou toute autre solution, avec régulation de débit.
- une conduite cylindrique avec une section de mesure de la vitesse et de la pression.
- une partie terminale avec un dispositif de mesure de débit .

a- L'ALIMENTATION:

Cette première partie est composée d'une cuve d'alimentation de capacité de l'ordre de 100 litres et d'une pompe munie d'un variateur de vitesse à poulie et courroie, pour le réglage du débit. Pour l'eau, le nombre de Reynolds maximum atteint est de l'ordre de 1.6×10^5 .

b- LA CONDUITE:

La conduite est lisse et réalisée en éléments de cuivre de diamètre intérieur égal à 26 ± 01 millimètres; elle comporte:

- un mélangeur, prévu pour l'écoulement de l'émulsion de pétrole.
- une portion de conduite pour la mesure de la perte de charge sur une longueur de 892 millimètres avec une longueur d'entrée de 50 fois le diamètre.
- Des prises de pression, constituées en 4 orifices de diamètre de 1 millimètre. Ces dernières, sont branchées avec un capteur de pression différentielle, qui a été étalonné pour les basses et les hautes pressions (PLANCHES 12 et 13).
- Une portion en plexiglas pour visualiser l'écoulement. sa longueur est de l'ordre de 34 Centimètres.
- Un venturi en plexiglas pour la mesure de la vitesse d'écoulement. Le rapport du diamètre du col par rapport au diamètre de la conduite est de 14/26. Pour ce rapport le début de cavitation est observé pour un nombre de Reynolds de l'ordre de 0.8×10^5 .

c- LA SECTION EN AVAL.

Cette section est composé d'un assemblage de deux cuves. La première cuve communique directement avec le réservoir d'alimentation, en écoulement permanent et la deuxième, qui est graduée et étalonnée, permet la mesure du débit (PLANCHE 14).

un partiteur permet de diriger le fluide sur la première cuve ou la deuxième, suivant le besoin.

2.2.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX.

a- ESSAIS AVEC L'EAU (PLANCHES 15 et 16)

La qualification de l'installation a été réalisée en mesurant la perte de charge de l'eau, dans une portion de conduite, qui a été judicieusement bien choisie. Les résultats de la planche 15, montre que la mise au point de l'installation n'est pas assurée pour les faibles régimes. Les erreurs sont dues au fait; que le partiteur n'assure pas une bonne étanchéité entre les deux cuves, pour les faibles débits. Néanmoins; on remarque que les résultats de la planche 16, sont en bon accord avec l'équation de PRANDTL-VON KARMAN.

Toutefois; il est envisagé de contrôler le débit en continu, au moyen d'un venturi. Nous avons vu précédemment; que le venturi est le siège de cavitation au niveau du col pour les nombres de REYNOLDS supérieurs à $0.8 \cdot 10^5$. Compte tenu de la viscosité plus élevée des émulsions et de la tension de vapeur de l'huile, il y a lieu d'éviter cette cavitation, en particulier, en modifiant le rapport de contraction du venturi. Le calcul suivant, a permis de modifier ce rapport afin d'atteindre le régime maximum de la pompe qui est de 3.12 Litres par seconde (sans présence de cavitation) tout en ayant une sensibilité suffisante du venturi.

L'équation de BERNOULLI, appliquée à l'écoulement dans le venturi; nous permet d'écrire:

$$\frac{P_1 - P_c}{\rho \cdot g} = \frac{V_1^2 - V_c^2}{2g} = \frac{8 \cdot Q_{max}^2}{\pi^2 \cdot 2g} \cdot \left(\frac{1}{d_c^2} - \frac{1}{d_1^2} \right)$$

avec : P_1 : pression à l'entrée de venturi

P_c : pression au col

$d_1 = D$: diamètre de la conduite

d_c : diamètre du col

La pression à l'entrée du venturi a été mesurée pour le maximum de la pompe.

débit maximum : $Q_{maxi} = 3.12 \text{ L/s}$ $d_1 = 26 \text{ mm}$ $P_c = P_0 = 1 \text{ atm.}$	}	diamètre du col modifié. $\rightarrow d_c = 15.1 \text{ mm.}$
--	---	--

b- ESSAI DE DEGRADATION D'UNE SOLUTION DE POLYOX 301 (PLANCHE I7)

Les essais de dégradation, ont été réalisés sur trois concentrations d'une solution diluée de POLYOX 301. Les résultats obtenus, illustrent très bien l'effet de dégradation par la pompe, des solutions de polymères et particulièrement, les solutions concentrées. On remarque; que le taux de réduction de frottements a diminué de 70% dans un temps relativement court (de l'ordre de 5 minutes). Pour les temps plus long; on observe une dégradation très lente, le taux de réduction de frottements tendant progressivement vers zéro.

D'après ce résultat, on peut conclure; que si on veut appliquer d'une manière efficace et rentable, les solutions de polymères pour réduire les frottements dans les installations industrielles, il faut éviter de les faire passer par les pompes. Néanmoins; on peut considérer que le taux de réduction de frottements reste acceptable; lorsque le passage dans la pompe est unique.

On peut envisager d'injecter le polymère après la pompe. Cette méthode a été appliquée avec succes pour les réseaux d'égoûts [14] , dans le but d'en accroître la capacité en cas de crue.

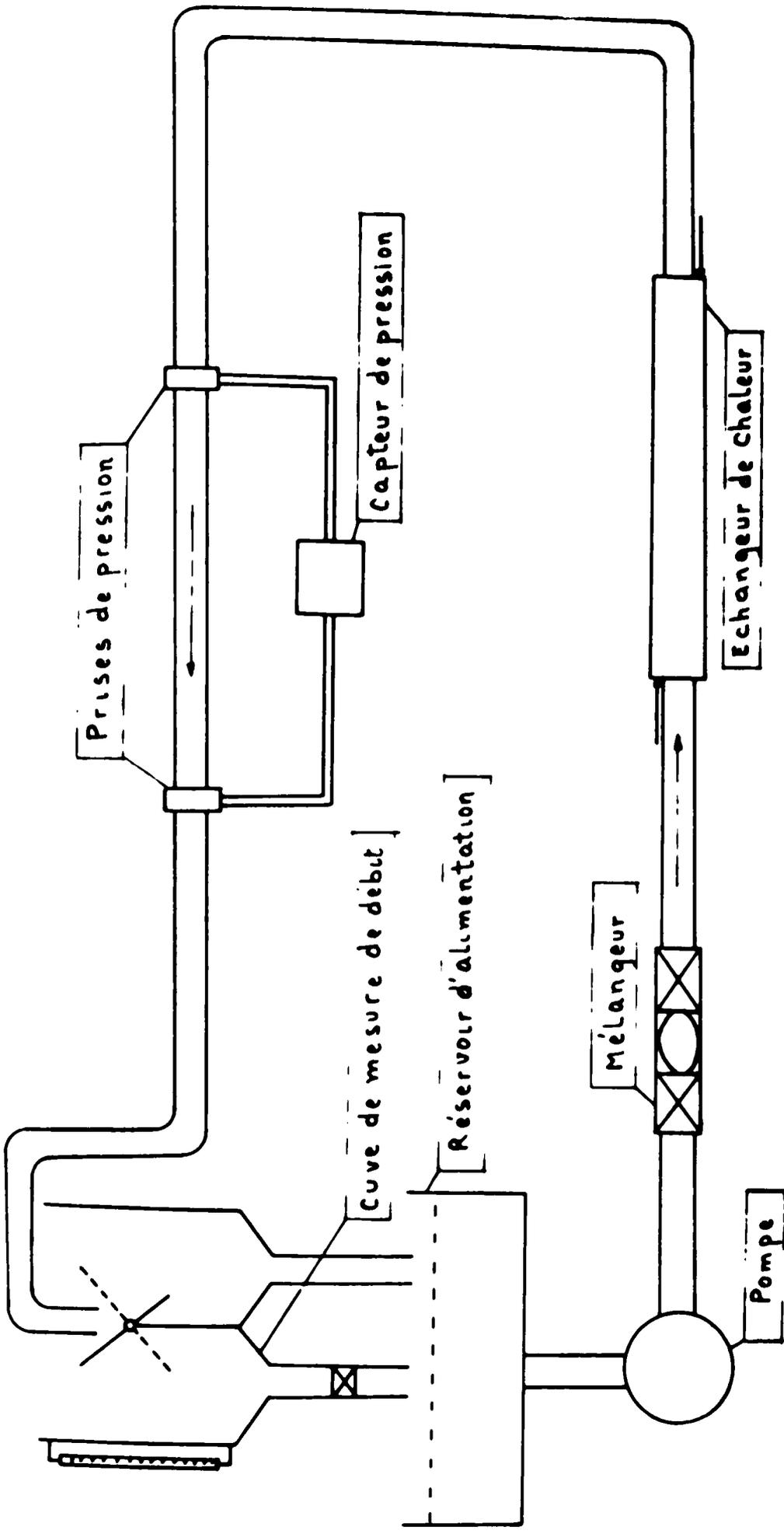
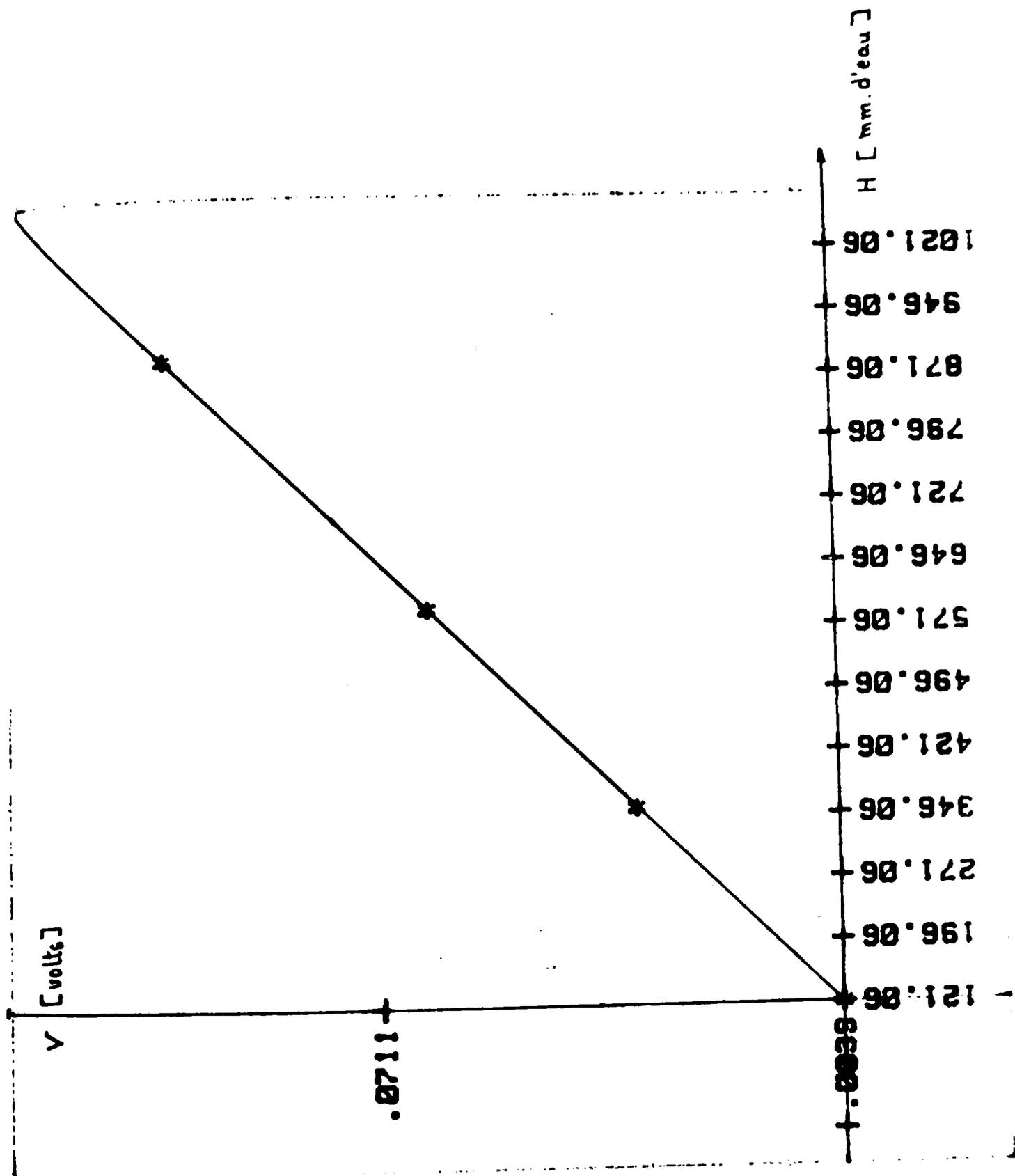
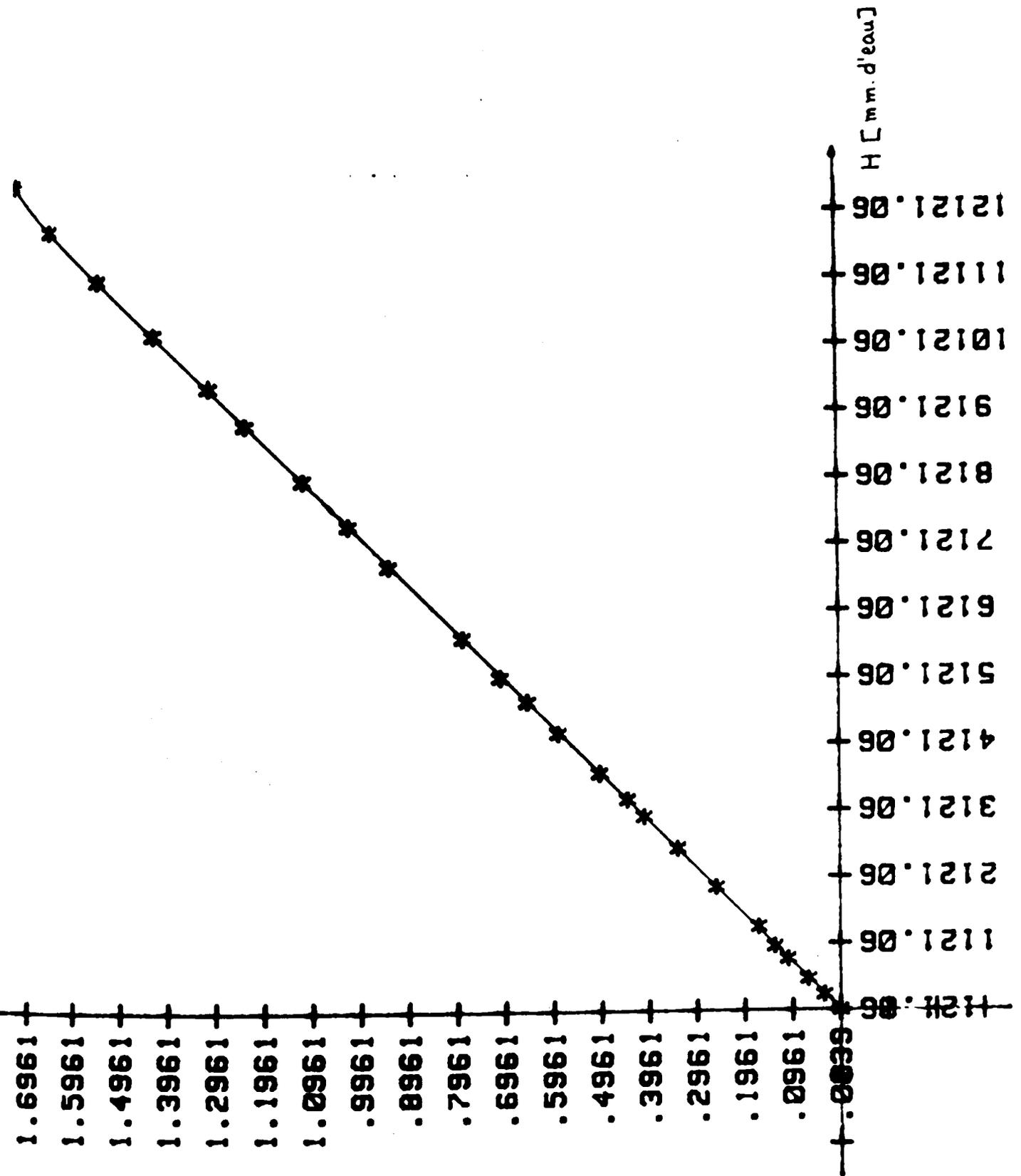


PLANCHE VII: Schema de l'installation hydraulique.



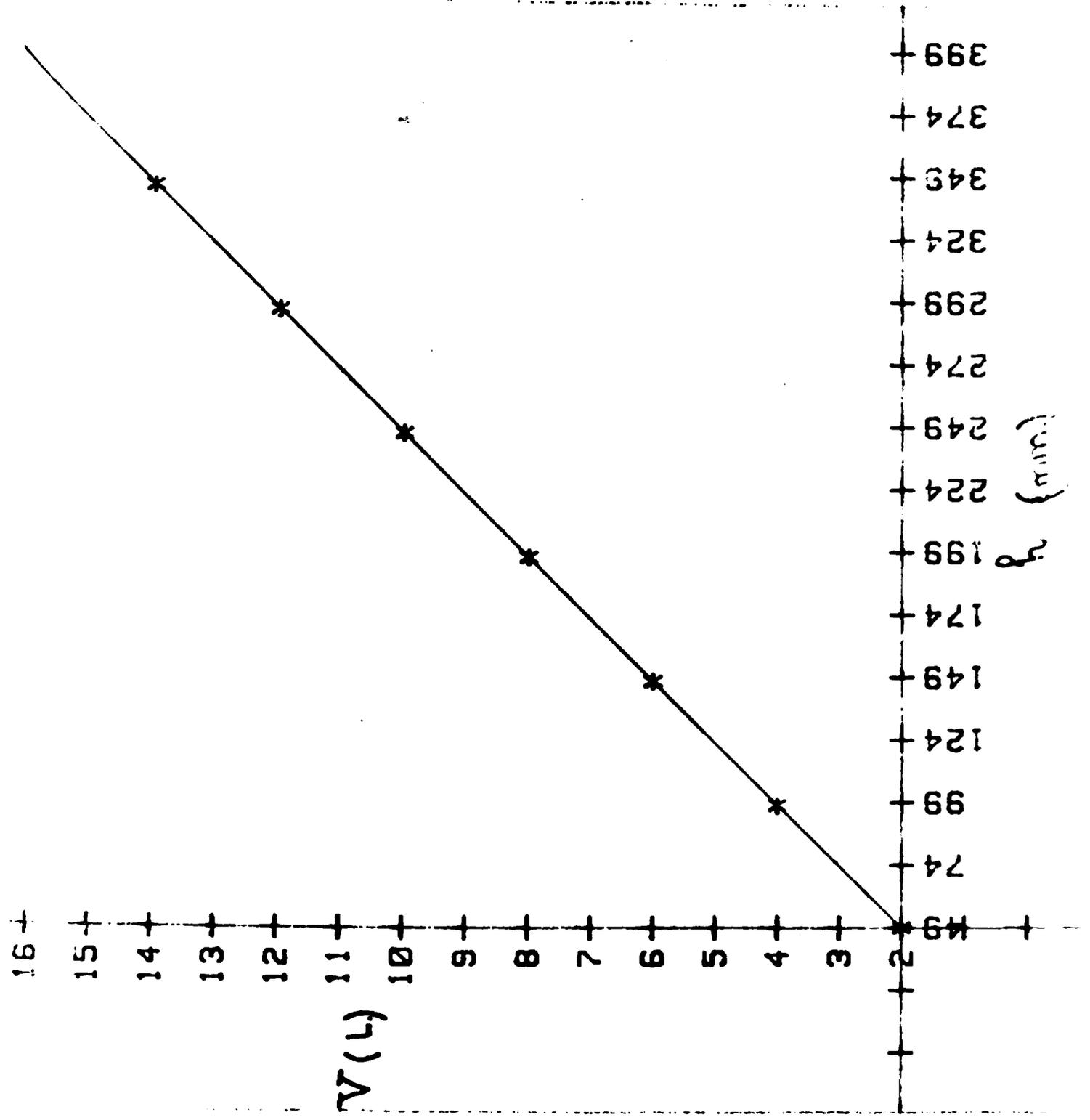
LINEAR

**PLANCHE 12 : Etalonnage du capteur
basse pression.**



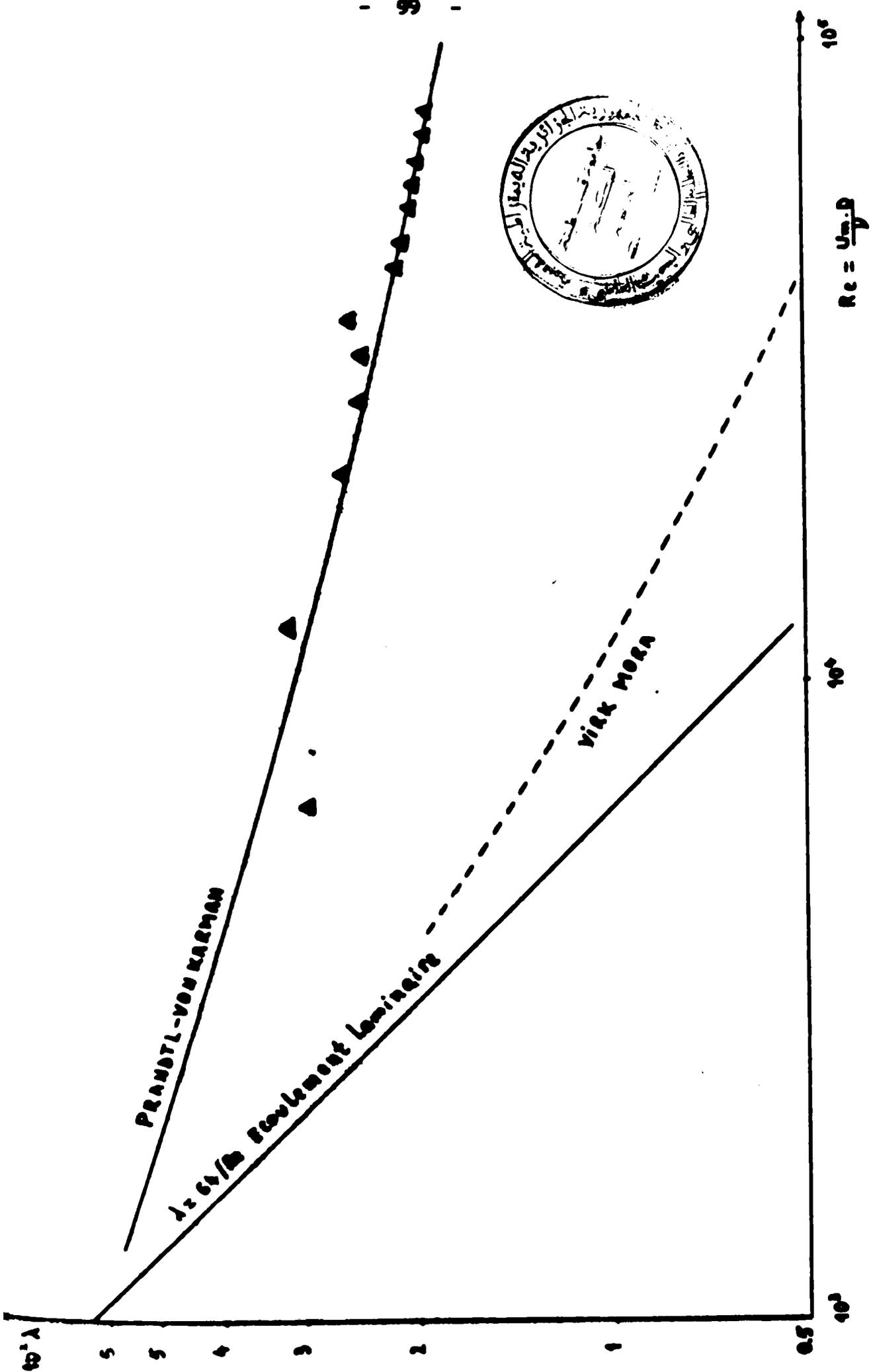
LINEAR

PLANCHE 13: Etalonnage du capteur
Haute pression.



LINEAR

PLANCHE 14: Etalonnage de la cube de mesure de débit.



LANCHE 15: Qualification de l'installation avec de l'eau.

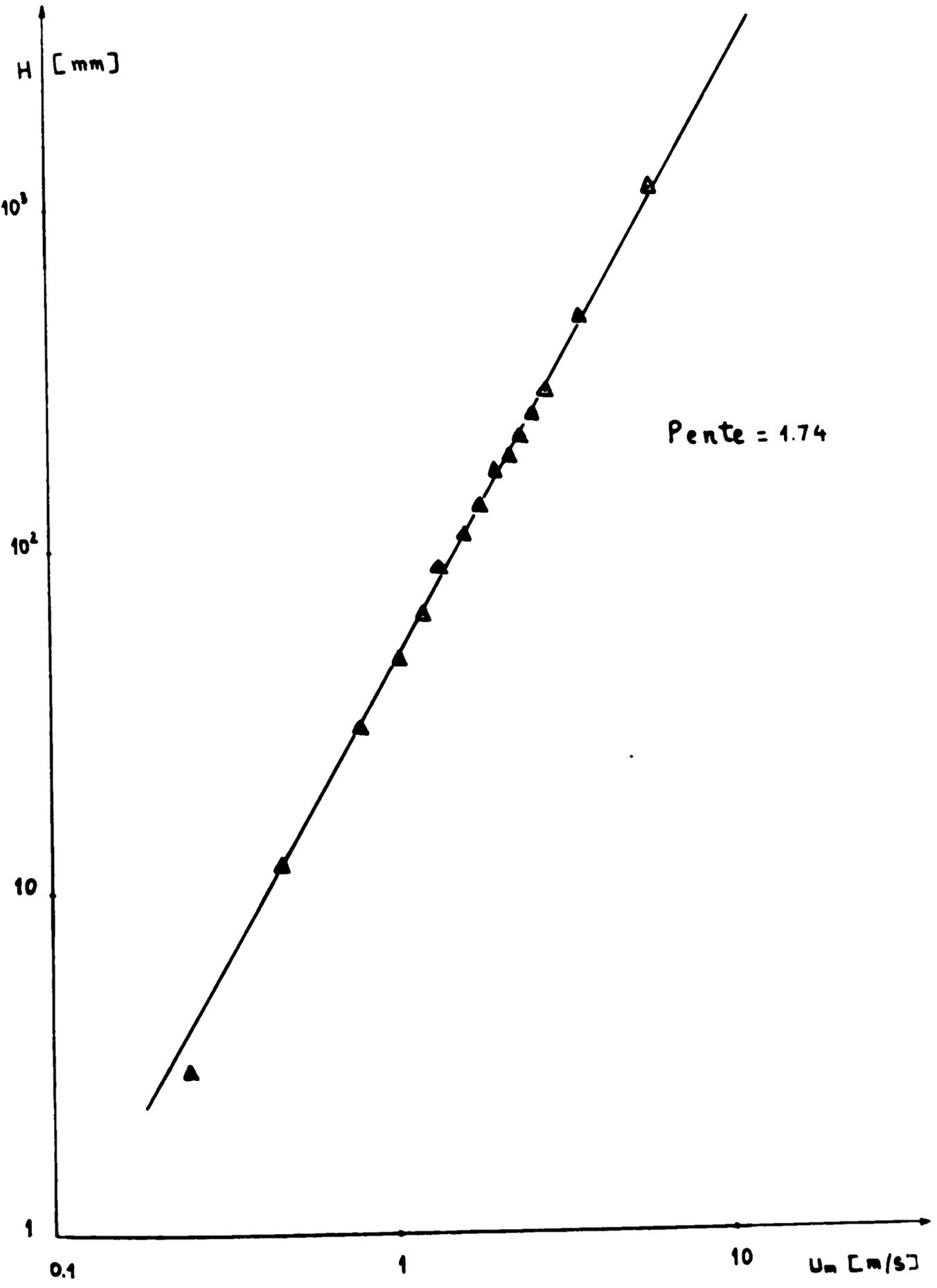


PLANCHE 16: Qualification de l'installation avec l'eau .

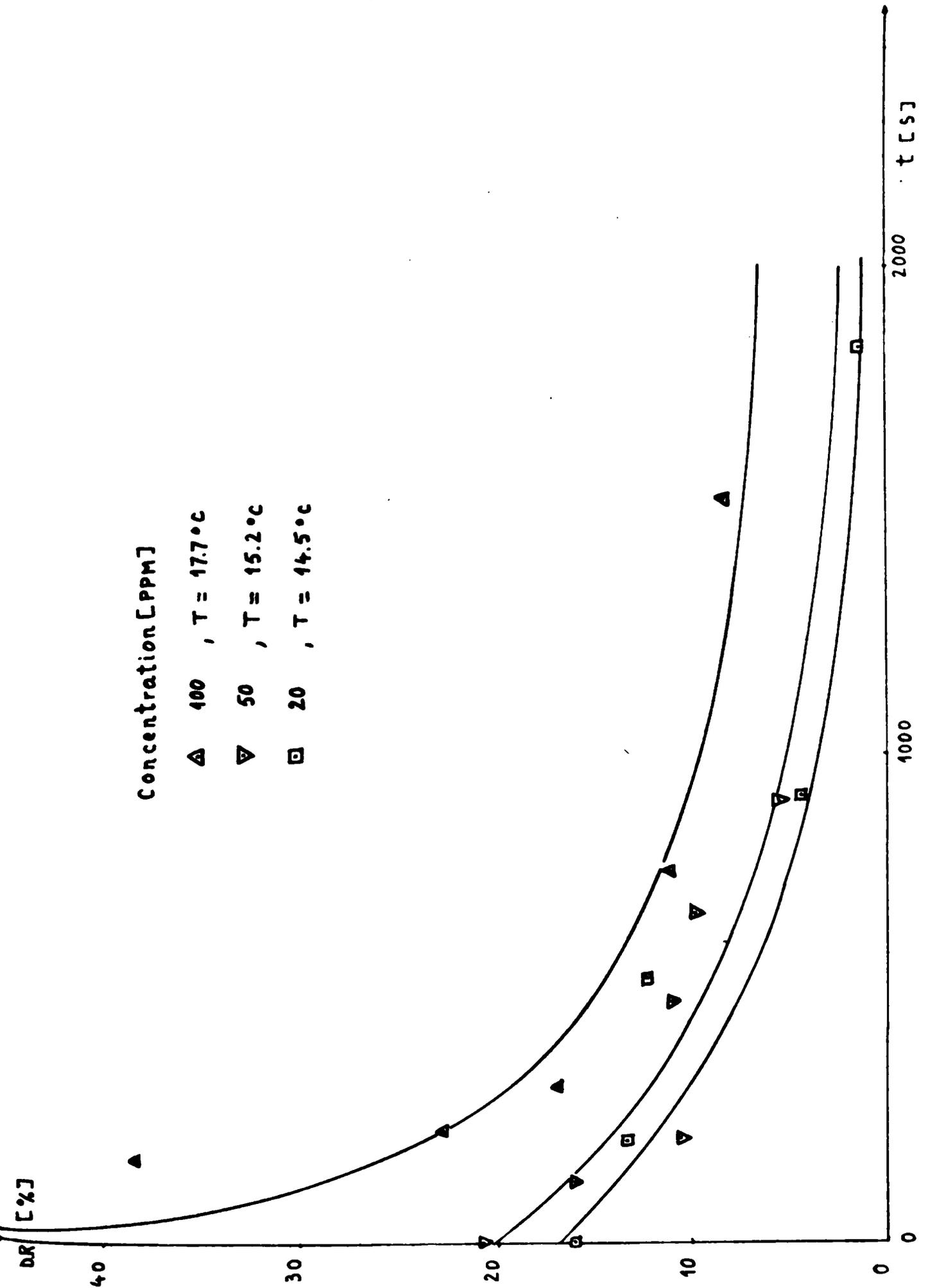


PLANCHE 17: Dégradation des solutions de POLYOX 30I.
par la pompe.

-o- (CONCLUSION -o-

Ce travail expérimental, nous a permis de vérifier des comportements plus ou moins connus, relatifs aux solutions de polymères. Il a permis aussi de découvrir des comportements nouveaux et assez spéciaux, relatifs aux émulsions.

Pour les solutions de polymères et spécialement; les solutions de POLYOX 301; on peut retenir les résultats suivants:

- La viscosité des solutions diluées est presque constante et peut être approximée à la viscosité du solvant . Ceci; n'est pas le cas des solutions semi-diluées ou des solutions concentrées.
 - Les solutions diluées de POLYOX. 301, ont un effet remarquable sur la réduction de frottement. Mais; elles sont très sensibles aux gradients élevés de vitesse de cisaillement; ou il ya un phénomène de dégradation des molécules de POLYOX. Ceci; provoque une augmentation relative des frottements.
 - Les solutions semi-diluées ou les solutions concentrées, qui sont transportées à l'aide des pompes, sont soumis de la part de ces dernières à une dégradation rapide et très importante.
- Pour le cas de l'émulsion de » TASFALOUT« , on peut conclure:
- Au point d'inversion des phases, il existe un pic remarquable; qui correspond au maximum de viscosité. Au voisinage de ce point, les émulsions ont un comportement rhéologique non-newtonien et ne répondant pas au modèle de la loi de puissance.
 - La viscosité des émulsions de faible concentration en huile est quasi-constante.
 - La » TASFALOUT« a un comportement newtonien.

- Les concentrations plus faibles, aussi bien que les concentrations plus grandes, que celle qui correspond au » pic de viscosité « , les émulsions ont un comportement rhéologique d'un fluide d'OSTWALD.

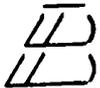
- L'étude de perte de charge de l'émulsion de TASFALOUT nous a révélé un comportement assez spécial de réduction de frottement. Cette dernière décroît avec l'augmentation du gradient de vitesse et qu'elle peut même devenir négative, pour les nombres de Reynolds plus élevés. Le point d'intersection de la courbe de mesure de frottement et de la courbe de PRANDTL-VON KARMAN, se déplace suivant les gradients de vitesse positif pour les concentrations plus faibles.

On a pu constater, que le comportement en perte de charge de l'émulsion du pétrole Iranien est identique à celui de l'émulsion de la TASFALOUT

Les conclusions, ci-avant, montrent que le comportement rhéologique de l'émulsion de TASFALOUT , ainsi; que son écoulement en conduite sont complexes et présentent un intérêt scientifique considérable. Il est donc; important, que les effets constatés; tels que le pic de viscosité , la réduction de frottement, doivent être étudiés plus profondément avec les moyens de mesure plus précis. On peut envisager:

- Une étude microscopique et chimique pour expliquer l'inversion des phases et l'existence du pic de viscosité .
- De modéliser les concentrations qui sont voisines du point d'inversion des phases.
- Compte tenu de l'effet d'échelle, utiliser une assez large gamme de diamètres de conduite - concevoir un système qui permet une gamme assez large de vitesses pour l'étude de la perte de charge en régime transitoire.

J'espère que les résultats de ce travail puissent ouvrir la voie à une recherche plus poussée, pour les Algériens soucieux de contribuer à notre industrie pétrolière.

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

I-BIBLIOGRAPHIE UTILISEE:

- 1 - BEBHARD SCHRAMM: Introduction à la viscosimétrie pratique
- 2 - La Houille Blanche /N°5 - (1970)
- 3 - W. PARZONKA: Transport solide en conduite
- 4 - H. SCHLICHTING: Boundary layer theory (1968)
- 3 - R.S BRODKEY: The phenomena of Fluid motions (1967)
- 4 - O. SCIVENLER : Thèse de Doctorat es-sciences physiques(1967)
- 5 - PIV. DANCKWERTS and R.F. Baddour: NON newtonien Fluids Fluid Mechanics, Mixingand heat transfert. Vol.1.
- 6 - P.L. BANSBACH: The how and wky of emulsions(7 sept 1970)
- 7 - BROUCTION and L. SQUIRES: The viscosity of oil-Water emulsions.
- 8 - W.WOEL-LIN: The viscosity of crude oil emulsions(10 Mars 1942)
- 9 - J. BRIANT: Transport de pétroles bruts lourds sous forme d'émulsion. Huile dans l'eau (10 Déc 1981)
- 10 - J. CORTEVILLE: Expérimentation des écoulements diphasiques en conduite pétrolières: Boucle d'essai de BOUSSENS(1983)
- 11 - O. SCRIVENER: Turbulent flow of polymer solutions.
- 12 - O. SCRIVENER: Titres et travaux (Novembre 1981)
- 13 - P.S.VIRK: Drag reduction Fundamentals . Aiche journal (vol.21 N°4) July, 1975.
- 14 - R.J.M SELLIN: Experiments with polymer additives in long pipeline (sept . 1974)
- 15 - M.HUG: Mécanique des Fluides appliquée (1975)
- 16 - A.FORTIER: Contribution à la mesure des pression dans les écoulements turbulents. Conférence du 25 Mai 1945.

II- BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE:

- 17 - I.R VAN WAZER: Viscosity and flow measurement(1963)
- 18 -C.C MILL: Rheology of disperse systems (1959)
- 19 - P. SHERMAN: Rheology of emulsion (1962)
- 20 - The viscosity of emulsions Rheology Acta.Band 2, Helf 1 (1962).
- 21 - R.S LENK: Plastics theology, Maclaren and sons(1968)
- 22 - P. SHERMAN: Industrial Rheology, Academic press.
- 23 - J.B. WARD, J.F.KINNEY, H.Y.SAAD: Application of rheological to product formulation, stability and processing problems (1974)
- 24 - C.F COLEBROOK: Turbulent flow in pipe with particular reference to the transision region between the smoth and rough pipe laws (1939)
- 25 - V.L STREETER: Steady flow in pipe and conduits (1950)
- 26 - H.DARCY: Recherches expérimentales relatives aux mouvements de l'eau dans les tuyaux 15, 141(1858)
- 27 - L.F MOODY: Friction factors for pipe flow, 66,671(1944)
- 28 - L. PRANDTL: The mechanics of viscous fluids III,142 (1935)
- 29 - V.L STEETER: Frictional resistance in artificially roughened pipes 61,163 (1935)
- 30 - EINSTEIN: Ann. Physik 9.289(1906) et 34,591 (1911)
- 31 - SIBREE: Trans. Faraday soc. 27,161 (1931)
- 32 - HATSCHEK: KOLLOID- Z 8,34 (1911)
- 33 - RICHARDON: KOLLOID-Z 65,32 (1933)
- 34 - BATOMS: On the early experiments on drag reduction by polymers the physics of fluids vol.20, N°10,Pt II, oct. 1977.
- 35 - J.L ZAKIN and D.L.HUNSTON: Mechanical degradation and drag reduction efficiency of dilute solution of polystyrene. 2nd Int. Conf. On dragreduction August 31, St Sept 2nd , 1977.

- 36 - J.W HOYT: The effect of additives on fluid friction.
Transactions of the ASME, June 1972.
- 37 - MICHAEL POREH, SL. ZAKIN, A.BROSH et M. WARSHAUSKY.
Reduction of turbulent friction in liquid by dissolved
additives . Nature Nov.26, 1966. Vol. 212.
- 38 - I.A.H.R TASK FORCE ; Drag reduction application . (April
1979)
- 39 - The pollution potentiel of drag reducing polymers.
Aiche journal, 69,130,1973, F.87-90.
- 40 - COMPTE BELLOT G: Anémomètre à fil chaud (fluides
incompressibles (Sept 1973).
- 41 - M. BARAT: Les mesures de pression à l'aide de prises à
la paroi (Sept 1973).
- 42 - M. BARAT: Contribution à la mesure des pressions
dans les écoulements turbulents. These.
- 43 - B.DESSUS: Vélocimètre à laser. Houille Blanche 1972 N°8
- 44 - A.FORTIER: Sur la mesure des débits variables au moyen de
dispositifs déprimogènes.
- 45 - Un nouveau de débitmètre Ultrasonique. La technique de
l'eau. WESTIN GHOUSE.
- 46 - I.S.O: Mesure de débit des fluides au moyen de
diaphragmes et tuyères. Projet de recommandation I.S.O
N° 532.

Une classe assez vaste de liquides non-newtoniens (boues, laitiers de ciment, graisses, émulsions, certains pétroles bruts etc...) a un comportement rhéologique qui peut être représenté par la loi D'OSTWALD.

Lorsqu'on est en régime laminaire, on peut calculer les pertes de charge dans des conduites circulaires destinées à transporter un liquide non-newtonien de cette classe.

En régime turbulent les lois donnant les pertes de charge sont différentes de celles établies pour les fluides newtoniens. Pour certains fluides non-newtoniens (solutions de polymères), les pertes de charge peuvent être plus faibles, pour le même débit, que dans le fluide de base. Le même phénomène de réduction des pertes de charge a été observé pour l'émulsion d'un pétrole Iranien et particulièrement pour une émulsion d'une huile de coupe dénommée " TASFALOUT-22B "

MOTS CLES :

Fluide - rhéologie - viscosité - perte de charge - émulsion - nombre de Reynolds- contrainte de cisaillement - gradient de vitesse.