

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT: **genie chimique**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

**etude de la viscosite des
liquides Purs et des solutions
aqueuses**

Proposé par :

M^r TYCZKOWSKI.

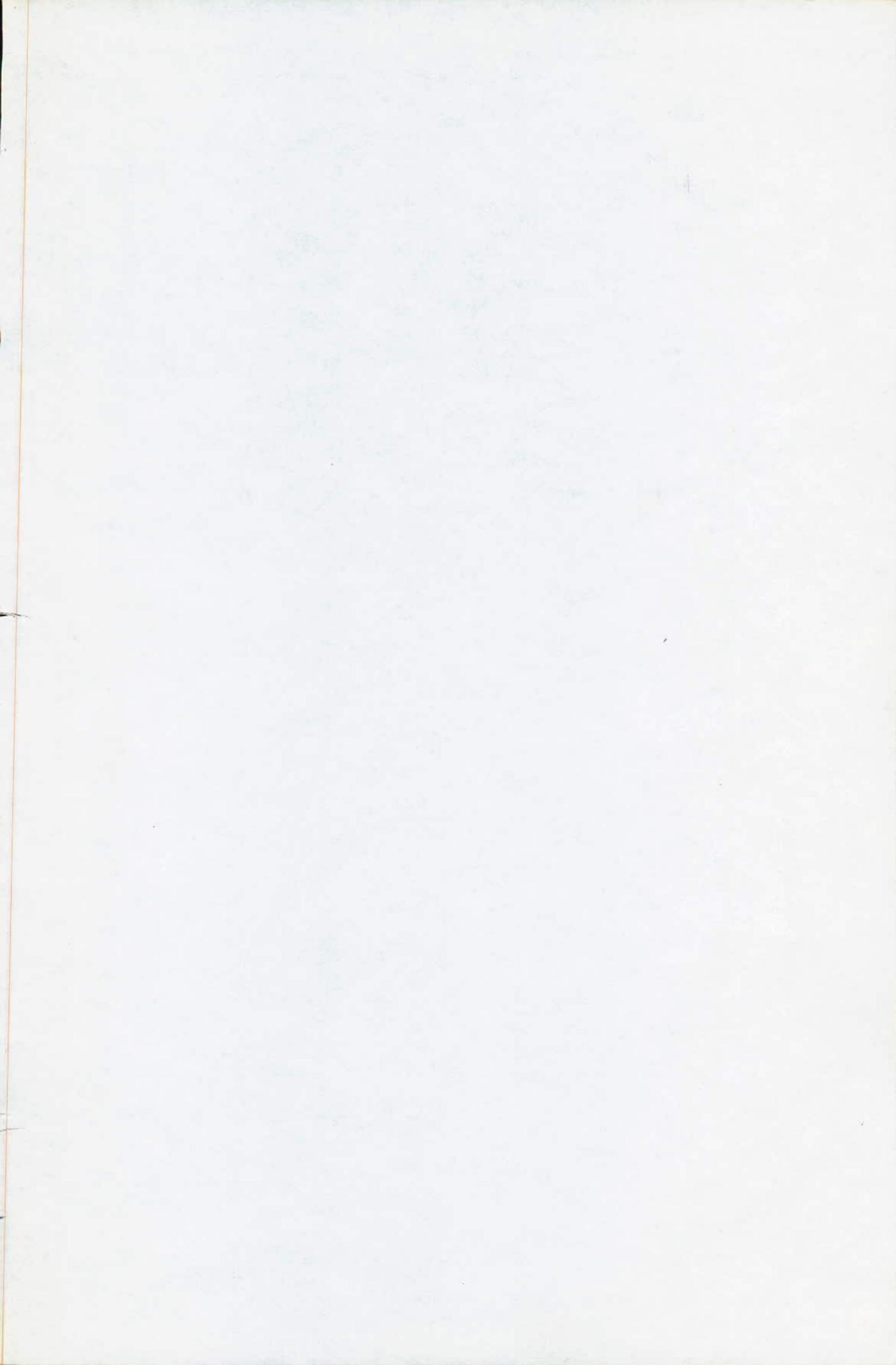
Etudié par :

M^r MAMMERI.

Dirigé par :

M^r. TYCZKOWSKI.

PROMOTION : **Jan. 88**



ooo00ooo DEDICACES ooo00ooo

A la mémoire de mon défunt père

A ma mère

A mes frères ABDELKADER ; MOHAMED; YUCEF .

A mon neveu BOUABLELLAH

A MOHAMED HARRICHANE

A tous mes amis .

Je dédie ce modeste travail

1. ***** REMERCIEMENTS *****

Ce travail a été réalisé au département du Génie Chimique de l'école nationale polytechnique sous la direction de Monsieur A . TYCZKOWKI Maitre de conférence à l'ENP .

Je tiens à exprimer tous mes remerciement à Monsieur TYCZKOWKI pour les conseils qu'il m'a prodigué .

Mes remerciements les plus vifs vont également à Monsieur A . BENDJEMAA qui a bien voulu m'honorer de sa présence et de présider le jury pour juger ce modeste travail .

Que , : M^{me} F . MOHELLEBI

Mr . LOUKES

trourent ici l'expression de mes sincères remerciements pour avoir accepter de faire partie du jury d'examination .

Que Mrs : A . REZIG

R . AMRI

B . GHEZALI B

A . LABBACI

D . A. SA

reçoivent mes remerciements pour l' aide qu'il mon apporter pour la réalisation de ce manuscrit .

I/ Introduction	1
II/ Partie Théorique	
II- 1 Généralités	3
II- 1-1 Etat fluide de la matière	3
II- 1-2 Fluides parfaits - Fluides réels	
II- 1-3 Force de cohésion - Force d'adhésion	
II- 1-4 Forces de viscosité	4
II- 2 Définitions	6
II- 2-1 Mise en évidence de la viscosité: expérience de COUETTE	
II- 2-2 Viscosité dynamique : définition de NEWTON	7
II- 3 Mesure de la viscosité	8
II- 3-1 Appareil de mesure	
II- 3-2 Méthode de mesure	9
II- 3-3 Unité et conversion	
II- 4 Influence des différents paramètres sur la viscosité	12
II- 4-1 Influence du gradient de vitesse: fluide NEWTONIEN- fluide non NEWTONIEN	
II- 4-2 Influence de la température	13
II- 5 Variation de la viscosité pour différents fluides	14
III/ Viscosité des gaz et des liquides: considérations générales	15
III- 1 Théorie de la viscosité des gazs	16
III- 2 Théorie de la viscosité des liquides	
IV/ Corrélations relatives à la viscosité	21
IV- 1 Viscosité des gazs à pression atmosphérique	21
IV- 1-1 Corps purs	
IV- 1-2 Mélanges de gaz	
IV- 2 Viscosité des gaz comprimés	23
IV- 2-2 Mélanges de gaz comprimés	
IV- 3 Viscosité des liquides	24
IV- 3-1 Corps purs	
IV- 3-2 Mélanges des liquides	27
Partie Expérimentale	
- Introduction	30
I/ Appareillage	
II/ Produits utilisées	33
III/ Résultats expérimentaux	35
- Liquides purs	
1- Influence de la température	35
2- Calcul de la viscosité par les corrélations	36
- Interprétation	37

3 - Influence de la température et composition sur viscosité 37
du système : eau - glycérine

- Résultats expérimentaux et Interprétation 38

4 - Influence de la température et la concentration sur
la viscosité des solutions aqueuses 39

- Interprétation.

Conclusion

L'écoulement des fluides est un problème qui a retenu l'attention des hommes depuis la haute antiquité sans pour autant trouver une théorie répondant aux différentes questions qui sont restées posées depuis.

Ce n'est qu'au début du 18^{ème} siècle que PITOT, BERNOULLI et NEWTON posèrent les pierres de l'édifice définitif en établissant les équations qui décrivent l'écoulement des fluides parfaits et immédiatement après, celles des fluides réels en tenant compte des frottements internes qui freinent l'écoulement. Ces frottements sont la conséquence de l'existence d'une force dite : tension de cisaillement, qui engendre une caractéristique appelée : " Viscosité " .

La viscosité est un critère d'identification des lubrifiants; son évolution avec la température permet le choix judicieux du lubrifiant pour une application déterminée. Pour les fuel-oils; elle se substitue aux normes de distillation en servant de paramètre à la classification des produits lourds; donc dans le domaine du raffinage du pétrole, la viscosité est classée comme étant une norme d'analyse et de classification des fractions issues du brut.

La viscosité permet aussi de connaître les caractéristiques apparentes des émulsions et leur degré de thixotropie et détermine les conditions de pompabilité des liquides, comme elle régit de nombreux phénomènes en transfert de matière ou de chaleur

La connaissance de la viscosité des fluides revêt donc une importance particulière dans la pratique; car il est souvent nécessaire de connaître la viscosité des phases; liquides ou gazeuses qui s'écoulent dans les gisements d'hydrocarbures ou dans les installations annexes à la surface: la détente isotherme qui a lieu dans la roche magasin et la détente polytropique qui lui fait suite dans les installations annexes sont souvent capables de créer deux phases là où il n'y avait qu'une seule et de provoquer ensuite entre elles des échanges moléculaires qui modifient sans cesse la composition et par conséquent: en particulier leur viscosité.

Mesurer la viscosité des fluides dans toutes les conditions où il peut être nécessaire de la connaître est une opération coûteuse et fréquemment imprécise, aussi tout procédé de calcul qui permettrait de déterminer à partir des propriétés plus faciles à mesurer et avec une précision comparable à celle de mesure directe présenterait

faciles à mesurer et avec une précision comparable à celle de la mesure directe présenterait un intérêt majeur pour la bonne exécution des calculs.

L'objet de notre travail consiste à passer en revue quelques méthodes de calcul publiées par les différentes recherches dans ce domaine aussi bien pour les gaz que pour les liquides, mélanges ou à l'état pur; notre étude va porter essentiellement sur l'influence de deux paramètres:

— L'influence de la température sur la viscosité des liquides purs au dessous de leur point d'ébullition .

— L'influence de la concentration des solutions aqueuses sur la viscosité.

**PARTIE
THEORIQUE**

II - 1 - 1 : ETAT FLUIDE DE LA MATIERE :

On définit l'état fluide de la matière, par opposition à l'état solide, en considérant les éléments qui ont une forme propre et ceux qui épousent la forme du récipient qui les contient; un fluide est donc synonyme de liquide, gaz ou vapeur. (1)

II - 1 - 2 : FLUIDE PARFAIT - FLUIDE REEL :

L'application d'une force à un système fluide engendre des réactions internes qui se manifestent par l'apparition de forces qui s'opposent à la déformation. Quand le fluide est au repos, ces forces internes sont nulles et l'on se contentera d'écrire l'équation d'équilibre des contraintes extérieures: Cette étude s'appelle l'hydrostatique. Si le fluide est en mouvement, l'équation d'équilibre devra comporter tous les termes de forces internes et externes afin de pouvoir calculer la vitesse de déformation.

On isole par la pensée un élément différentiel de fluide parallélépipédique et l'on décompose le système de forces qui lui est appliqué en contraintes normales aux faces et contraintes tangentielles. Le glissement du filet fluide s'accompagne d'un frottement freinant la déformation et correspondant à une force tangentielle de cisaillement qui est d'autant plus importante que la viscosité est élevée. Un fluide présentant un tel comportement est dit fluide réel.

Dans certains cas, la dimension, la structure et l'éspacement des molécules sont tels que les forces internes de viscosité sont très faibles et peuvent être négligées; on a alors affaire à un fluide parfait. (1)

II - 1 - 3 : FORCE DE COHESION - FORCE D'ADHESION :

La force de cohésion est celle qui lie entre elles les molécules d'un corps. Ainsi les corps solides ont des forces de cohésion très fortes, celles d'un liquide sont plus faibles et celles d'un gaz très faibles; à l'intérieur d'un même groupe ces forces varient et le degré de cohésion entre les molécules d'un même fluide détermine

ces forces varient et le degré de cohésion entre les molécules d'un même fluide détermine sa viscosité.

*** La force d'adhésion, cause d'adhérence, est la force qui accroche les liquides aux solides et à un degré moindre, les solides entre eux .

Dans la pratique, on constate que:

— Les corps solides ont généralement une force de cohésion importante mais une force d'adhésion faible. Pour les liquides on constate le contraire.

— Lorsque, dans un même groupe de corps, les forces de cohésion augmentent, celles d'adhésion diminuent et vice - versa. (2)

II - 1 - 4 : FORCES DE VISCOSITE :

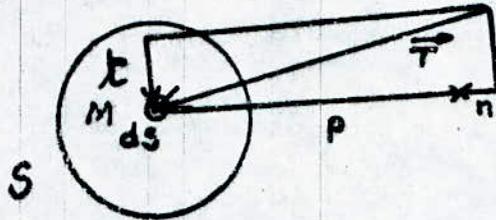
L'étude expérimentale du mouvement des fluides réels laisse apparaître quelques divergences avec celui qu'on peut prévoir dans la théorie des fluides parfaits. Dans certains cas ces divergences sont assez atténuées, mais parfois elles sont très importantes.

La notion de fluide parfait ne correspond donc qu'à une première approximation en dynamique des fluides réels; on admet par conséquent que les fluides réels sont doués d'une propriété particulière introduisant des forces d'un type nouveau; connu sous le nom de viscosité ou frottement interne.

Quand on suppose le fluide parfait, les actions de contact qui s'exercent sur un élément de surface pris dans le fluide: appelé : "élément de couche fluide" sont toujours normales à cet élément. Ces forces sont désignées sous le nom de pression ; s'il s'agit d'un fluide réel on doit admettre que ces actions de contact ne sont plus normales mais qu'elles présentent une composante tangentielle, dans le plan de l'élément de surface considéré. Cette composante joue le rôle d'une force de frottement comme on en trouve dans le mouvement relatif de deux surfaces solides en contact.

En un point " M " d'un élément de surface dS d'une particule de fluide réel, la tension " T " est donc inclinée sur la normale à dS ; la tension " T " est toujours dirigée vers l'intérieur de la particule.

Nous décomposons cette tension en deux composantes normale et tangentielle:
 La viscosité introduit cette dernière et modifie également la valeur de la composante normale par rapport à celle qu'on trouverait en un fluide parfait. (3)



La tension s'exerçant en un point " M "

t la composante tangentielle de la tension de viscosité,

n : " normale " " "

P : " normale: Pression .

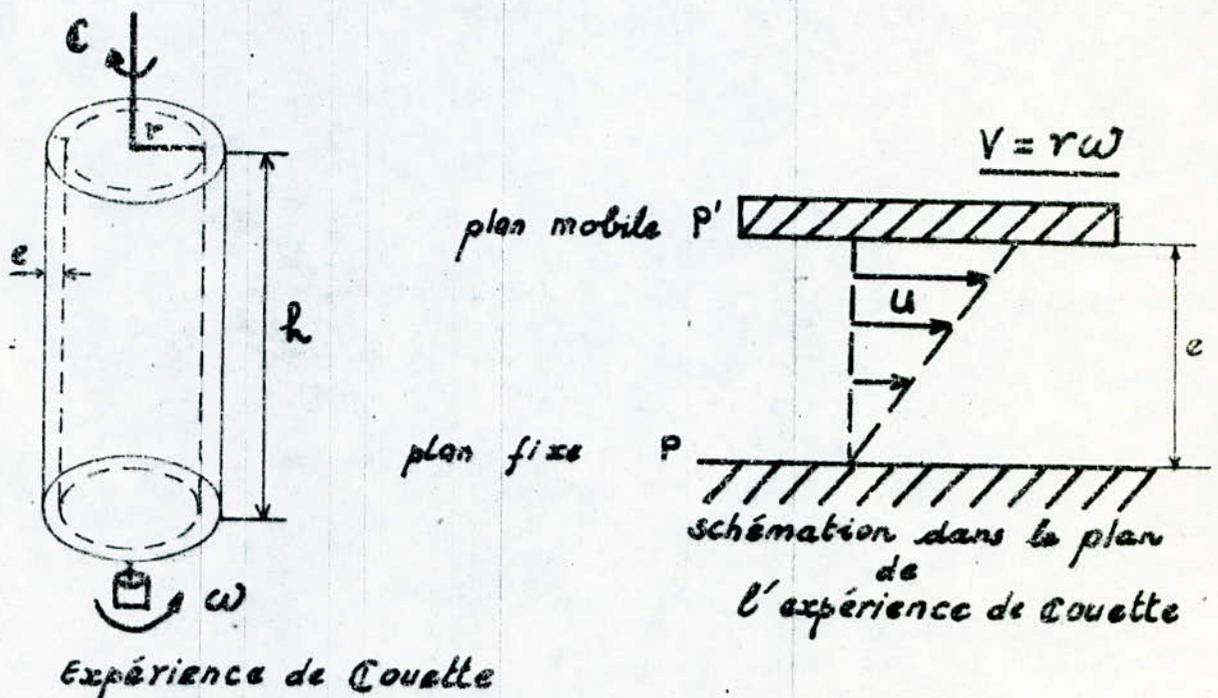
II - 2 : DEFINITIONS :

II - 2 - 1 : MISE EN EVIDENCE : EXPERIENCE DE COUETTE :

Il est facile de montrer l'existence des forces tangentielles de cisaillement qui sont responsables de l'existence de la viscosité à l'aide de l'expérience suivante .

Soient deux cylindres circulaires, coaxiaux, de rayons peu différents et dont l'espace intermédiaire est rempli de fluide. Si on entraîne le cylindre extérieur avec un moteur; avec une vitesse angulaire " ω ", on constate que le cylindre intérieur a tendance à tourner dans le même sens. La distance " e " entre les cylindres étant petite devant le rayon moyen " r ", on peut schématiser l'expérience en considérant un plan mobile " P' " se déplaçant parallèlement à un autre fixe " P " de surface $S = 2\pi r h$ à la distance " e " et une vitesse $V = r\omega$.

Sur la plaque fixe " P " s'applique une force parallèle à " P "; elle est due à la présence du fluide intermédiaire .



Tant que " w " reste inférieure à une valeur critique " w_c ", l'expérience montre que la force " F " varie comme $\frac{SV}{e}$ et on écrira :

$$F = \mu \frac{SV}{e}$$

Avec μ un coefficient qui ne dépend que de la nature du fluide et de la température, il est appelé coefficient de viscosité dynamique ou coefficient de frottement interne, on l'appelle aussi viscosité absolue dynamique .

Sans l'action de ce frottement il s'établit dans le fluide un état de mouvement tel que les couches qui se trouvent en contact direct avec les plaques ont la même vitesse qu'elles: Conséquence d'adhérence aux plaques; tandis que les couches intermédiaires glissent les unes sur les autres avec des vitesses " U " proportionnelles à leur distance " y " à la plaque fixe " P " .

Si on l'a rapporte à l'unité de surface, cette force de frottement a pour valeur

$$\tau_0 = \mu \frac{v}{e}$$

Où $\frac{v}{e}$ représente le gradient de vitesse $\frac{dU}{dy}$ entre les deux plans, gradient qui est ici constant car on ne peut dans ce cas mettre en évidence d'éventuelles composantes de force de viscosité perpendiculaires aux surfaces cylindriques.

Pour exprimer cette force de frottement d'une manière générale, on dira que la tension tangentielle engendrée lorsque les couches fluides glissent les unes sur les autres est égale à :

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy}$$

en évidence

Ainsi l'expérience de COUETTE met et permet de mesurer le coefficient de viscosité, en effet le moment du couple de frottement (freinage) est égal à :

$$C = \tau_0 S r = \mu \frac{S r v}{e} ; \text{ avec } v = \omega r \text{ et } S = 2 \pi r h.$$

On en tire:
$$\mu = \frac{C e}{2 \pi r^3 h \omega}$$

II - 2 - 2 : VISCOSITE DYNAMIQUE; DEFINITION DE NEWTON :

NEWTON a défini la viscosité comme étant le coefficient de proportionnalité spécifique du fluide, entre la vitesse relative et la force de frottement parallèle au déplacement.

Soient deux éléments plans de fluide dans une veine, animés de vitesses absolues respectives U et $U + dU$. Le frottement de ces deux éléments engendre une force dF ; opposée à la direction de la vitesse, parallèle aux plans et retardant le mouvement d'un plan par rapport à l'autre.

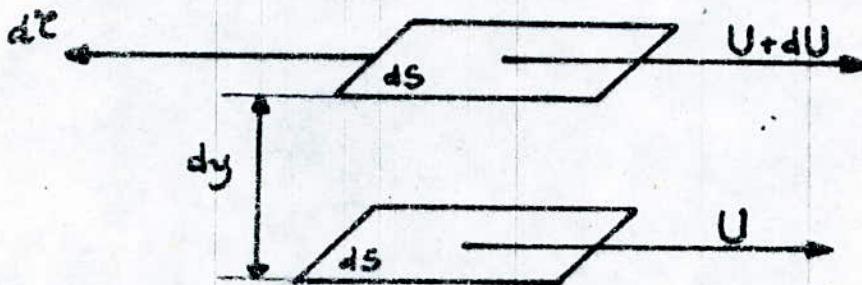
Si dS est la surface de ces deux éléments et dy la distance qui les sépare; la force dF s'écrit alors: $dF = -\mu dS \frac{dU}{dy}$.

— $\frac{dU}{dy}$ est la dérivée de la vitesse du fluide prise perpendiculairement au sens de l'écoulement: (gradient de vitesse).

— Le signe (-) correspond à l'orientation de la force dans le sens contraire de la vitesse.

— Le rapport $d\tau = \frac{dF}{dS}$ est appelé contrainte de cisaillement, il a les dimensions d'une pression.

— μ est appelé coefficient de viscosité absolue dynamique ou viscosité absolue dynamique, sa définition reste valable et peut être considérée comme correcte pour les gaz; d'après la théorie cinétique des gaz. (1)



II - 2 - 3 : VISCOSITE CINEMATIQUE :

En mécanique des fluides, on est amené à considérer des forces rapportées à l'unité de volume. Si on divise la viscosité absolue dynamique par la masse spécifique, on obtient la viscosité absolue cinématique. ()

II - 3 : MESURE DE LA VISCOSITE:II - 3 - 1 : APPAREILS DE MESURE :

Les appareils destinés à la mesure de la viscosité sont classés en trois catégories principales :

Viscosimètres capillaires ;

Viscosimètres rotatifs ;

Viscosimètres empiriques .

Dans la première catégorie, on peut citer : les viscosimètres UBBELOHDE; ZETZFUCH CANNON - FENSKE à écoulement inversé pour les liquides opaques . Le principe de mesure est basé sur la loi de POISEUIL :

$$Q = k \frac{d^4 \bar{w}}{\mu} \quad \text{où :}$$

— Q représente le débit

— d " le diamètre du capillaire

— \bar{w} " la perte de charge dans le capillaire

— μ " le coefficient de viscosité absolue dynamique ;

Donc pour un capillaire donné , en maintenant la perte de charge constante il suffit de mesurer le débit pour déterminer la viscosité . Le plus souvent l'écoulement est dû à la force motrice de la pesanteur qui est proportionnelle à la masse volumique ρ . En pratique on mesure le temps d'écoulement " t " d'un volume donné " V " au travers d'un capillaire de diamètre " d " ; la force motrice équilibre la perte de charge et la formule de POISEUILLE devient alors :

$$\frac{V}{t} = k \frac{d^4 k' \rho}{\mu} \quad \text{où encore en rassemblant les constantes}$$

$$\rho = \frac{\mu}{K t} = K t$$

K représente dans ce cas la constante d'étalonnage du viscosimètre.

Notons enfin que l'écoulement doit être laminaire et isotherme pour que la mesure soit valable.

Dans la deuxième catégorie; on peut citer le viscosimètre FERRANTI - SHIRLEY Cold Cranking Simulator (C.C.S.); Brookfield à chute de bille ...

Ces appareils mesurent directement la force nécessaire ou la réaction observée lorsqu'un cylindre est maintenu fixe tandis que l'autre tourne à vitesse constante. LES deux premiers types permettent de plus de faire varier le gradient de vitesse de sorte qu'il est possible de mesurer la viscosité des liquides newtoniens et les liquides non-newtoniens.

Dans la troisième catégorie; on cite le viscosimètre ENGLER , Saybolt , Redwood... Ils sont tous basés sur le même principe : mesure du temps d'écoulement d'un volume donné du fluide au travers d'un orifice calibré. Chaque appareil détermine une échelle totalement arbitraire, des tables correspondantes permettent de convertir en unités légales. (2)

II - 3 - 2 : METHODS DE MESURE :

A / VISCOSITE DYNAMIQUE :

Deux méthodes de mesure sont pratiquées :

- Mesure du couple de démarrage ou couple résistant présenté par le fluide; ce dernier étant placé dans un récipient porté à la température de mesure.
- Mesure du temps de chute d'une bille calibrée à travers le liquide contenu dans un tube cylindrique calibré et incliné dans le plan vertical; l'ensemble est porté à la température de mesure. (6)

Les normes de mesure internationales sont:

- Normes françaises NF T42 - 011 / 69 .
- Normes Américaines ASTM D 2983 / 72 .
- Normes d'Allemagne fédérale DIN 53015 B

B / VISCOSITE CINEMATIQUE :

Elle se mesure par le temps d'écoulement du liquide entre deux traits repères d'un tube capillaire calibré vertical monté généralement sur tube en " U " .

L'écoulement doit être donc laminaire et isotherme.

Les normes de mesure sont:

- Normes françaises NF T60 -100 / 70 .
- NORMES Américaines ASTM D 445 -68 .
- Normes allemandes DIN 51361.
- Normes anglaises IP 71 / 66 .

II - 3 - 3 : UNITES ET CONVERSION :

D'après la définition de NEWTON; le coefficient de viscosité absolue dynamique s'écrit :

$$\mu = \frac{F/S}{dU/dy}$$

L'équation aux dimensions est donc:

$$[\mu] = \frac{M L T^{-2} L^{-2}}{L T^{-1} L^{-1}} = M L^{-1} T^{-1}$$

Dans le système SI: μ s'exprime en kg/ms .

Dans le système C.G.S : il faudra exprimer :

- La force F en dynes (1 dyne = 10^{-5} N);
- La surface S en cm^2 ;
- La vitesse U en cm/s ;
- La distance y en cm .

Dans ces conditions μ s'exprime en dynes secondes / cm^2 . Cette unité est appelée la poise.

Le coefficient de viscosité absolue cinématique est obtenu en divisant le coefficient de viscosité dynamique par la masse volumique ρ . L'équation aux dimensions est la suivante :

$$[\nu] = \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \frac{M L^{-1} T^{-1}}{M L^{-3}} = L^2 T^{-1}$$

Dans le système SI s'exprime en m^2/s ;

Dans le système c C.G.S il s'exprime en cm^2/s , qui est appelée le Stokes.

En pratique on utilise le centipoise et le centistokes qui sont respectivement la viscosité dynamique et cinématique de l'eau à 20°C.

La viscosité cinématique peut être exprimée en unités empiriques :

- Degré Engler: C'est le quotient de la durée d'écoulement (S) d'un volume de liquide (200 cm³) à travers un orifice étroit calibré , à la température de mesure par le temps d'écoulement de la même quantité d'eau à 20°C.

— Secondes Saybolt Universel : SSU₁₀₀ si la mesure est effectuée à 100°F
 (liquides moins visqueux) et SSU₂₁₀ si la mesure est effectuée à 210°F (liquides
 visqueux) . Le "bureau of standart " préconise la formule de conversion suivante :

$$\gamma(\text{cSt}) = \frac{N}{P} = 0,219 t - \frac{149,7}{t} \quad ; \quad t \text{ est le temps en secondes.}$$

II - 4 : INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES SUR LA VISCOSITE :

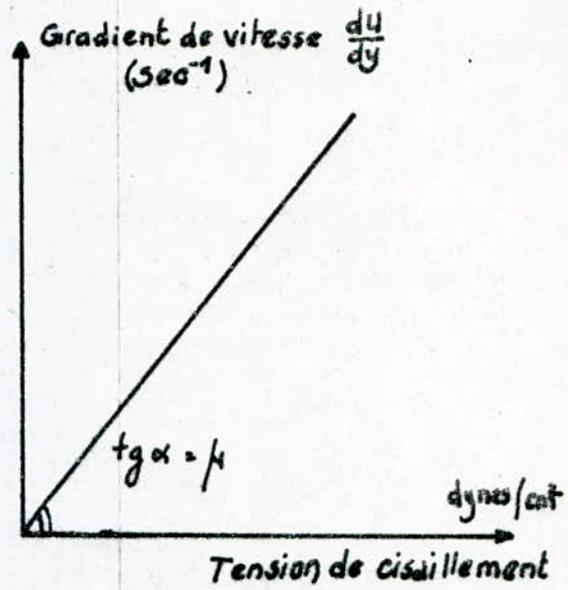
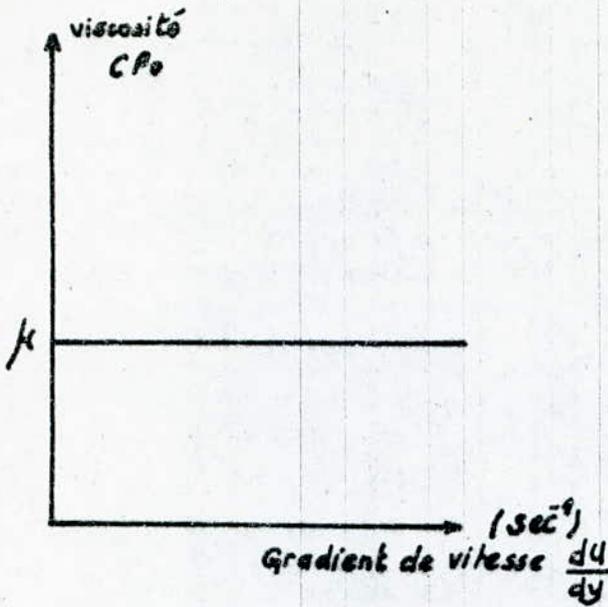
II - 4 - 1 : INFLUENCE DU GRADIENT DE VITESSE: FLUIDE NEWTONIEN; FLUIDE NON-NEWTONIEN/

On appelle fluide NEWTONIEN tout fluide dont le comportement expérimental vérifie l'équation: $dF = - \eta \, dS \frac{dU}{dy}$ et qui peut être caractérisé uniquement par sa viscosité; autrement dit : sa viscosité ne dépend pas du gradient de vitesse. Donc sa viscosité est constante pour tous les gradients de vitesse.

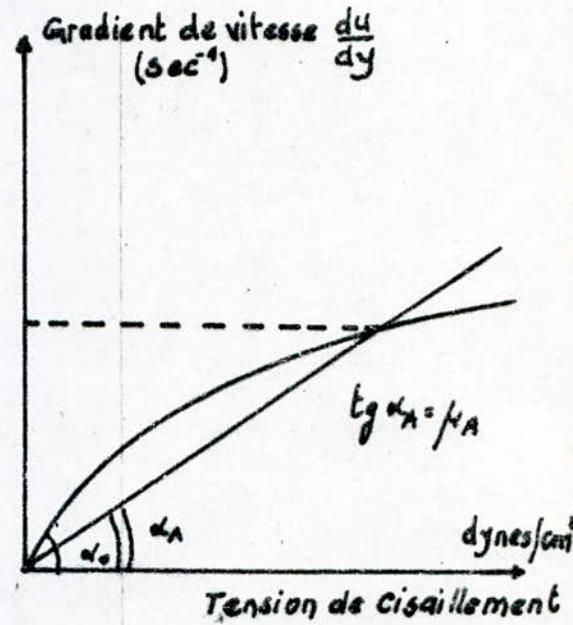
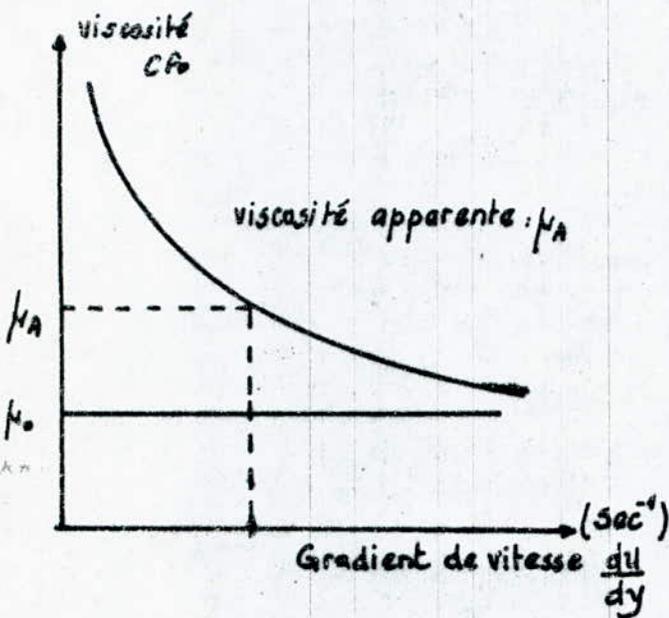
Par opposition, un fluide non - NEWTONIEN est un fluide dont le coefficient de viscosité décroît avec le gradient de vitesse et ne peut donc être caractérisé par sa viscosité; ce type de comportement est appelé comportement pseudoplastique :

— On observe une diminution progressive de la viscosité avec l'augmentation du gradient de vitesse. La viscosité apparente μ_A tend vers les gradients de vitesses très élevées vers la viscosité μ_0 du fluide utilisé dans la formulation. Il faut noter cependant que ce processus purement physique est réversible c'est à dire sous faible cisaillement le fluide récupère sa viscosité initiale. C'est le cas des huiles multigrades. Ce phénomène peut être intéressant du point de vue application car il conduit à une sorte d'auto-adaptation de la viscosité aux conditions de fonctionnement des différents éléments d'une machine. Dans un palier par exemple, la viscosité va diminuer avec la vitesse de rotation ce qui est souhaitable. (3)

variation de μ en fct du gradient de vitesse.



Liquides newtoniens



Liquides non-newtoniens.

II - 4 - 2 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE :

Les théories hydrodynamiques de l'écoulement des gaz et des liquides sont très semblables. Les mécanismes cinético - moléculaires sont très différents . Dans les gaz ; la viscosité augmente quand la température augmente et elle est indépendante de la pression . Dans les liquides ; la viscosité augmente avec la pression et décroît exponentiellement avec la température comme le signale GUZMAN CARRANCIS en 1913 ; on peut donc écrire μ sous la forme $\mu = A \exp\left(\frac{\Delta E_{vis}}{RT}\right)$. La quantité ΔE_{vis} mesure la barrière énergétique à franchir avant que l'écoulement élémentaire puisse commencer, elle s'exprime en mole de liquide (cal / mole). On considère que le terme $\exp\left(\frac{\Delta E_{vis}}{RT}\right)$ comme un facteur de BOLTZMANN indiquant la proportion de molécules ayant l'énergie voulue pour franchir la barrière énergétique. Si on appelle ΔE_{vap} , l'énergie nécessaire pour créer une lacune de dimension moléculaire ; le rapport $\frac{\Delta E_{vis}}{\Delta E_{vap}}$ est de l'ordre de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{4}$ pour de nombreux liquides ceci suggère que l'écoulement visqueux exige un espace libre de l'ordre de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{4}$ du volume de la molécule . (8)

II - 4 - 3 : INFLUENCE DE LA PRESSION :

Comme nous l'avons signalé ci dessus et comme le suggère la théorie cinétique des gaz ; le coefficient de viscosité d'un gaz parfait est indépendant de la pression par contre pour un gaz réel ce coefficient varie peu . (3)

Pour les liquides le coefficient de viscosité augmente quand la pression augmente suivant une loi pratiquement exponentielle de la forme $\mu = B \exp\left(\frac{P \Delta V^*}{RT}\right)$. ΔV^* : représente le volume de la lacune à créer pour que l'écoulement puisse avoir lieu. Pour la plupart des liquides ; il est égale à environ $\frac{1}{4}$ du volume de la molécule - gramme . (8)

II - 5 : VARIATION DE LA VISCOSITE POUR DIFFERENTS LIQUIDES :

D'une manière générale la viscosité dynamique des liquides est beaucoup plus grande que celle des gaz; mais inversement leur viscosité cinématique est souvent inférieure .

Le tableau ci-dessous donne une échelle comparative des propriétés visqueuses de quelques fluides . (3)

Fluide à 20° et 1 atm	Symbole	Viscosité dynamique (centipoise)	Viscosité cinématique (centistokes)	
GAZ	Hydrogène	H ₂	0,0091	109,00
	Ammoniac	NH ₃	0,0100	13,900
	Méthane	CH ₄	0,0110	16,500
	Gaz carbonique	CO ₂	0,0150	8,1400
	Azote	N ₂	0,0174	14,900
	Oxygène	O ₂	0,0201	15,100
	Air sec	—	0,0182	
LIQUIDES	Alcool méthylique	CH ₃ OH	0,5900	0,7450
	Benzène pur	C ₆ H ₆	0,6500	0,7450
	Mercure	Hg	1,5600	0,1150
	Alcool éthylique pur	C ₂ H ₅ OH	1,200	1,5200
	Glycérine	C ₃ H ₅ (OH) ₃	800	635

III - VISCOSITE DES GAZ ET DES LIQUIDES : CONSIDERATIONS GENERALES :

D'après la conception de la théorie cinétique des gaz, la viscosité est à considérer comme un phénomène d'échange à impulsions entre les couches fluides voisines de vitesses différentes, provoqué par le mouvement propre des molécules. L'égalisation de vitesses des couches voisines est suivant cette théorie, à considérer comme une sorte de phénomènes de diffusion : "Diffusion d'impulsion" ..

Dans le cas des gaz très rarifiés où la longueur du libre parcours moyen n'est plus assez petite par rapport aux dimensions du récipient pour pouvoir être négligé, on a constaté un glissement apparent le long de la paroi, qui provient de ce que les molécules venant du fluide en mouvement apportent en moyenne une composante de vitesse finie parallèle à la paroi; tandis que celles renvoyées par la paroi présentent une distribution désordonnée avec une composante tangentielle moyenne nulle; ainsi la valeur moyenne de la vitesse tangentielle de toutes les particules est différente de zéro.

Dans les gaz aux pressions ordinaires, la longueur du libre parcours moyen est si petite, que ce phénomène devient imperceptible.

Pour les liquides, l'origine de la viscosité est d'une autre nature. Les molécules sont ici étroitement liées (serrées) qu'en générale elles se meuvent que dans les étroits intervalles qui leur sont offerts et ne changent de place qu'occasionnellement; ces changements de place s'opèrent en général de façon irrégulière.

L'action d'une tension tangentielle, qui peut se présenter ici comme une tension élastique, résultant des forces moléculaires, favorise le changement de place dans sa direction, et il en résulte comme effet d'ensemble un glissement suivant la référence plus au moins grande des changements de places spontanés, il en résulte une viscosité faible ou forte du liquide.

On peut mentionner qu'à côté des liquides ordinaires pour les lesquels le glissement est rigoureusement proportionnel à la tension tangentielle; il y a aussi des liquides dits anormaux pour lesquels cette proportionnalité n'existe pas, il s'agit des états de transition entre l'état liquide et l'état solide ou le contraire. (4)

III - 1 : THEORIE DE LA VISCOSITE DES GAZ :

On considère un gaz pur composé de molécules sphériques, rigides, sans attraction et ayant un diamètre " d ", et une masse " m " chacune. ces molécules sont présentes dans une concentration de " n " molécules par unité de volume; on considère " n " petit telle que la distance moyenne entre les molécules soit comparable à leurs diamètres.

A l'équilibre thermodynamique; les vitesses moléculaires relatives à la vitesse du fluide " V " ont des directions arbitraires et ayant une intensité moyenne " \bar{U} " ; d'après la théorie cinétique des gaz ; cette vitesse est donnée par la relation suivante :

$$\bar{U} = \frac{8 K T}{m}$$

K étant la constante de BOLTZMAN;

T la température en KELVIN .

Le nombre d'impacts des molécules par unité de surface contre toutes les surfaces stationnaires exposée au gaz est :

$$Z = \frac{1}{4} n \bar{U}$$

La distance moyenne parcourue par une molécule entre deux collisions successives est appelée le libre parcours moyen: définit comme suit :

$$l = \frac{1}{2 \sqrt{2} n d^2}$$

Les molécules quittant un plan, en moyenne, à leur dernière collision une distance " a " de ce plan tel que :

$$a = \frac{2}{3} l$$

Pour déterminer la viscosité d'un gaz en termes de propriétés moléculaires; on considère le comportement du gaz en mouvement compris entre deux plans avec un gradient de vitesse $\frac{dV_x}{dy}$. En considérant les relations précédentes valables pour un tel cas ; le flux global résultant de la quantité de mouvement à travers chaque plan constant " y " se calcule en faisant la somme algébrique du flux des molécules traversant ce plan dans le sens positif et celui des molécules qui traversent ce

ce plan dans le sens opposé. Ce flux est donné par :

$$\tau_{yx} = Z m V_x|_{y-a} - Z m V_x|_{y+a}$$

En écrivant cela; nous avons supposé que le profil des vitesses est linéaire pour tout libre parcours moyen " l " ce qui permet d'écrire aussi :

$$V_x|_{y-a} = V_x|_y - \frac{2}{3} l \frac{dV_x}{dy}$$

et

$$V_x|_{y+a} = V_x|_y + \frac{2}{3} l \frac{dV_x}{dy} \quad \text{--- (6)}$$

En combinant les équations (2), (5) et (6) on obtient :

$$\tau_{yx} = - \frac{1}{3} n m \bar{u} l \frac{dV_x}{dy} \quad \text{--- (7)}$$

Ce résultat correspond à la définition de NEWTON pour la viscosité où elle est donnée par:

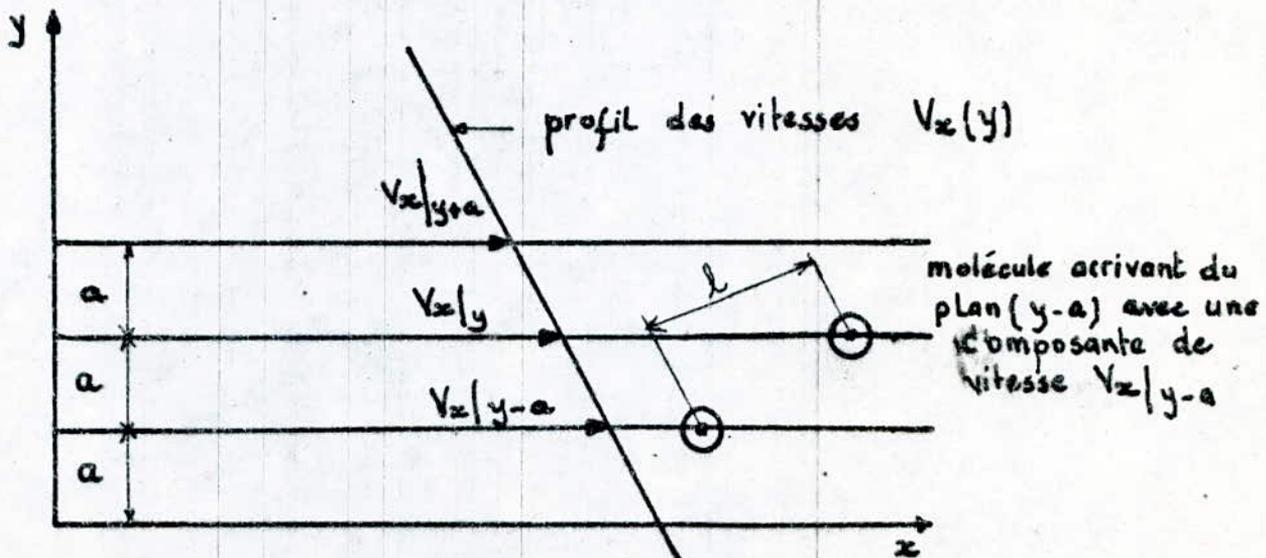
$$\mu = \frac{1}{3} n m \bar{u} l = \frac{1}{3} \rho \bar{u} l \quad \text{--- (8)}$$

Cette équation a été obtenue par MAXWELL en 1860

En combinant encore les équations (1), (3) et (8) on obtient :

$$\mu = \frac{2 \sqrt{m K T}}{3 \pi^{3/2} l^2} \quad \text{--- (9)}$$

Ce qui constitue la viscosité des gaz considérés comme étant composés de molécules sphériques .



TRANSPORT MOLECULAIRE DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT DU PLAN (y - a) AU PLAN (y)

III - 2 : THEORIE DE LA VISCOSITE DES LIQUIDES :

Les informations sur la viscosité des liquides sont largement empiriques, du fait que la théorie cinétique des liquides est partiellement développée. Il est intéressant donc de considérer la théorie approximative développée par EYRING et ses collaborateurs pour illustrer les mécanismes impliqués dans l'existence de la viscosité et permettant de l'estimer à partir d'autres propriétés physiques.

Dans un liquide au repos " apparent " les molécules sont constamment en mouvement; ce mouvement dû à la vibration de ces molécules et ayant chacune une énergie libre $\frac{\Delta G_0}{N}$ où N étant le nombre d'AVOGADRO .

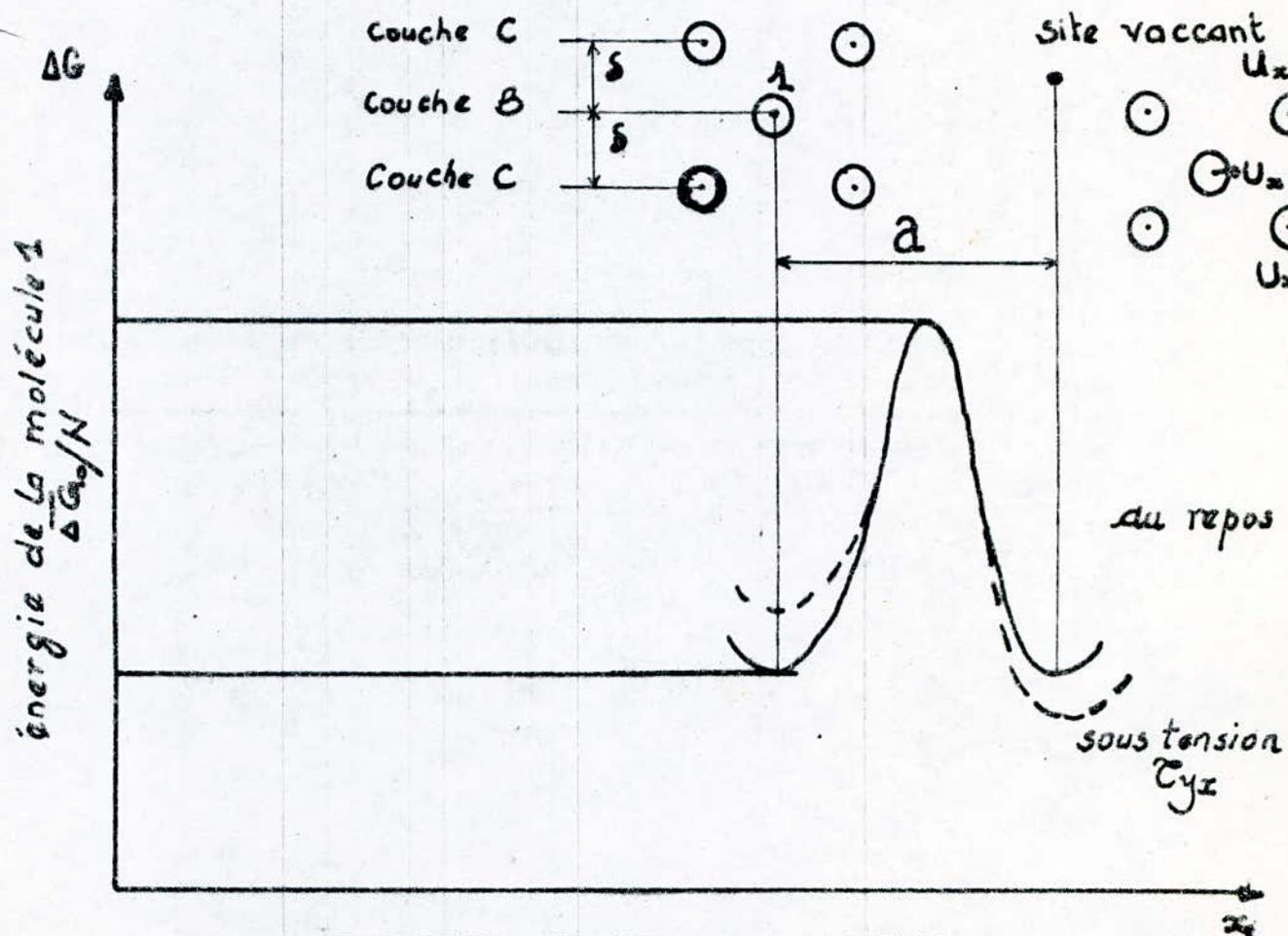


ILLUSTRATION D'UN ECOULEMENT D'UN LIQUIDE .

La molécule (1) passe obligatoirement par un étranglement pour atteindre le site vacant .

EYRING a suggéré que le liquide au repos présente un arrangement tel que chaque molécule peut se mouvoir dans toutes les directions avec une fréquence " k " par molécule; ce mouvement est sous forme de saut :

$$k = \frac{K T}{h} \exp \left(- \frac{\overline{\Delta G}}{R T} \right) \quad (1)$$

avec K : la constante de BOLTZMANN

h : " de PLANCK

$\overline{\Delta G}$: l'énergie libre d'activation " molaire " pour le fluide au repos .

Dans le fluide en mouvement; dans la direction (x) et avec un gradient de vitesse $\frac{dU_x}{dy}$, la fréquence d'arrangement des molécules augmente, ceci peut s'expliquer en considérant que la barrière d'énergie potentielle a été tordue sous l'effet de τ_{yx} tel que :

$$- \overline{\Delta G} = - \overline{\Delta G}_0 + \left(\frac{a}{\xi} \right) \frac{\tau_{yx} \overline{V}}{2} \quad (2)$$

\overline{V} étant le volume d'une mole de liquide .

La quantité $\left(\frac{a}{\xi} \right) \frac{\tau_{yx} \overline{V}}{2}$ est approximée au travail exercé sur les molécules qui se meuvent sous la tension de cisaillement au dessus de la barrière énergétique (signe +) et au dessous d' elle (signe -) .

On définit k_f comme la fréquence des sauts effectués en avant et k_b celle des sauts effectués en arrière ; par les molécules :

$$k_f = \frac{K T}{h} \exp \left(- \frac{\overline{\Delta G}_0}{R T} \right) \exp \left(\frac{a \tau_{yx} \overline{V}}{2 \xi R T} \right) \quad (3)$$

$$k_b = \frac{K T}{h} \exp \left(- \frac{\overline{\Delta G}_0}{R T} \right) \exp \left(- \frac{a \tau_{yx} \overline{V}}{2 \xi R T} \right) \quad (4)$$

La vitesse avec laquelle, les molécules de la couche " A " glissent sur celles de la couche " B " est égale à la distance parcourue par saut " a " . La fréquence des sauts effectués en avant est égale à $k_f - k_b$; tel que :

$$V_{xA} = V_{xA} \equiv a (k_f - k_b) \quad (5)$$

En considérant le profil des vitesses linéaire; pour une petite distance " δ " entre les couches A et B du liquide, on obtient :

$$-\frac{dU_x}{dy} = \left(\frac{a}{\delta}\right) (k_f - k_b) \quad \text{--- (6)}$$

Et en combinant les équations (3), (4) et (6) on aura:

$$-\frac{dU_x}{dy} = \left(\frac{a}{\delta}\right) \left[\frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G_0}{RT}\right) \left[2sR \left(\frac{a^2 \gamma_{yx} \bar{V}}{2\delta RT} \right) \right] \right] \quad \text{--- (7)}$$

Si de plus la quantité $\frac{a^2 \gamma_{yx} \bar{V}}{2\delta RT}$ est petite devant l'unité, et en comparant cette

équation à la définition de NEWTON; on obtient:

$$\mu = \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \frac{Nk}{V} \exp\left(\frac{\Delta G_0}{RT}\right) \quad \text{--- (8)}$$

Pour beaucoup d'applications $\left(\frac{\delta}{a}\right)$ est pris égal à l'unité ce qui donne encore

$$\mu = \frac{Nk}{V} \exp\left(\frac{\Delta G_0}{RT}\right) \quad \text{--- (9)}$$

ΔG_0 est déterminée empiriquement pour rendre l'équation compatible avec les résultats expérimentaux; elle peut être déterminée par la relation :

$$\Delta G_0 = 0,408 \cdot \Delta \bar{U}_{\text{vap}} \quad \text{--- (10)}$$

avec $\Delta \bar{U}_{\text{vap}}$: énergie de vaporisation au point d'ébullition normal. Et l'équation (8) devient :

$$\mu = \frac{Nk}{V} \exp\left(\frac{0,408 \Delta \bar{U}_{\text{vap}}}{RT}\right) \quad \text{--- (11)}$$

L'énergie de vaporisation $\Delta \bar{U}_{\text{vap}}$ peut être déterminée par :

$$\Delta \bar{U}_{\text{vap}} = \Delta \bar{H}_{\text{vap}} - RT_{\text{eb}} \quad \text{--- (12)}$$

Et par suite :

$$\mu = \frac{Nk}{V} \exp\left(\frac{3,8 T_{\text{eb}}}{T}\right) \quad \text{--- (13)}$$

T_{eb} : étant la température d'ébullition.

Les équations (11) et (13) montrent bien que la viscosité décroît avec l'augmentation de la température. (5)

IV : CORRELATIONS RELATIVES A LA VISCOSITE :

Les corrélations permettant d'estimer la viscosité d'un fluide, à partir des propriétés plus faciles à mesurer doivent s'appuyer sur une conception de la matière qui permet d'en déduire, par application des théorèmes de la mécanique des fluides et de la thermodynamique; des résultats conformes aux différentes constatations expérimentales, les plus variées qu'elles soient. La validité d'une conception ne doit se mesurer donc que par cette concordance.

Il existe en fait trois démarches essentielles permettant d'atteindre la viscosité d'un fluide .

- En s'appuyant sur la théorie cinétique des gaz;
- En s'appuyant sur la théorie des états correspondants;
- A partir d'une théorie propre à l'état fluide.

IV - 1 : VISCOSITE DES GAZ A PRESSION ATMOSPHERIQUE :

IV - 1 - 1 : CORPS PURS :

a) Corrélation de SUTHERLAND :

En tenant compte des forces attractives intermoléculaires (cas des gaz réels) SUTHERLAND proposa l'expression suivante permettant d'estimer le coefficient de viscosité en fonction de la température, dans un domaine allant de 0°C à 150°C.

$$\mu = \frac{A\sqrt{T}}{1 + \frac{S}{T}} \quad \text{en micropoises.}$$

la constante S est en KELVIN ; A est une constante ayant la dimension requise pour que la viscosité soit en micropoises . le tableau ci - dessous résume les valeurs de A et S pour l'azote , le dioxyde de carbone et les dix premières normales paraffines

Corps	N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	n-C ₄	n-C ₅	n-C ₆	n-C ₇	n-C ₈	n-C ₉	n-C ₁₀
A	13,8	16,13	10,64	9,48	8,83	8,56	8,49	8,46	8,44	8,43	8,42	8,41
S	104	258	199	224	259	300	350	404	460	520	581	643

b) corrélation de STIEL et THODOS :

En s'appuyant sur la théorie des états correspondants ces auteurs ont fourni la relation suivante permettant de calculer la viscosité des gaz.

$$\xi \mu(T) = 34 \cdot 10^{-5} T_r^{0,94}$$

$$\text{si } T_r < 1,5$$

$$\xi \mu(T) = 14,78 \cdot 10^{-5} (4,58 T_r - 1,67)^{5/8} \quad \text{si } T_r > 1,5$$

μ en micropoises.

le coefficient ξ a pour valeur $\xi = \frac{T_c^{1/6}}{T_M P_c^{2/3}}$

T_c , $T_r = \frac{T}{T_c}$, P_c et M sont respectivement la température critique, la température réduite, la pression critique et la masse moléculaire du corps en question.

IV - 1 - 2 : MELANGES DE GAZ :a) corrélation de CAAR :

Elle est applicable aux mélanges d'hydrocarbures et les mélanges contenant en plus l'azote et le dioxyde de carbone en faibles pourcentages. Elle s'écrit

$$\mu = \frac{\sum (x_i \sqrt{M_i} \mu_i)}{\sum x_i \sqrt{M_i}} \quad \text{micropoises}$$

x_i étant le titre molaire du constituant i de masse moléculaire M_i

et de viscosité

b) corrélation de WILKE :

Cette formule est surtout intéressante dans le cas des mélanges binaires elle peut s'étendre à des mélanges plus complexes.

$$\mu = \frac{\mu_1}{1 + \frac{x_2}{x_1} \varphi_{1,2}} + \frac{\mu_2}{1 + \frac{x_1}{x_2} \varphi_{2,1}} \quad (\text{micropoises})$$

$$\varphi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{2} \left[1 + \frac{M_i}{M_j} \right]^2}$$

x_i = titre molaire du constituant i .

IV - 2 : VISCOSITE DES GAZ COMPRIMES :IV - 2 - 1 : CORPS PURS :a) corrélation de COMINGS et EGLY :

S'inspirant de la loi des états correspondants, ces chercheurs ont publié en 1940, en se fondant sur des mesures faites sur le dioxyde de carbone, l'ammoniaque, le propane, le n-butane, l'isobutane, le méthane et l'azote, un diagramme donnant

$$\mu(P,T)/\mu(0,T) = f(P_r, T_r)$$

et qui couvre la gamme $1 < Tr < 2,8$; $0,2 < Pr < 20$. (9)

étant la viscosité à basse pression qui est généralement la pression atm .

b) corrélation de JOSSI, STEEL et THODOS :

Ces chercheurs ont préféré exprimer la différence $\mu(P,T) - \mu(0,P)$ plutôt que le rapport. Ils ont publié en 1962 : (9)

$$\left[\left[\mu(P,T) - \mu(0,T) \right] \rho + 10^{-4} \right]^{1/4} = f(e_r)$$

avec : $f(e_r) = 0,1023 + 0,023364 e_r + 0,058533 e_r^2 + 0,40758 e_r^3 + 0,0093324 e_r^4$

et $e_r = \frac{M^{1/2} P_c^{2/3}}{M^{1/2} P_c^{2/3}}$; étant la masse volumique réduite.

IV - 2 - 2 : MELANGES :a) corrélation de COMINGS et EGLY :

On peut s'en servir de deux façons :

— En calculant la viscosité des constituants purs à la pression considérée, puis en appliquant la corrélation de WILKE citée précédemment; dans le cas des mélanges à pression atmosphérique .

— En calculant la viscosité à faible pression du mélange par la formule de WILKE OU de CAAR; la viscosité à la pression voulue est alors obtenue à l'aide de l'abaque de COMINGS ET EGLY .

Pour cette corrélation, on peut définir les coordonnées pseudo-critiques par les équations :

$$T_{pc} = \sum x_i T_{ci}$$

$$P_{pc} = \sum x_i P_{ci}$$

Mais en général, pour un mélange d'hydrocarbures les moyennes pondérales sont préférables et on écrit :

$$T_{pc} = \frac{\sum x_i M_i T_{ci}}{\sum x_i M_i} ; P_{pc} = \frac{\sum x_i M_i P_{ci}}{\sum x_i M_i}$$

b) corrélation de EAKIN et ELLINGTON :

Ces deux auteurs proposent le calcul de la viscosité par la relation suivante

$$\eta(P,T) - \eta(0,T) = (32,80 - 0,1637M)(e^{7,237e} - e^{-45,9e^2})$$

ρ étant la masse volumique et M la masse molaire. (10)

IV - 3 : VISCOSITE DES LIQUIDES :IV - 3 - 1 : CORPS PURS:a) corrélation d'ORRICK et ERBAR :

Cette méthode est basée sur la contribution des groupements pour évaluer les constantes A et B dans la relation suivante:

$$\ln \frac{\mu}{\rho M} = A + \frac{B}{T}$$

ρ : densité du liquide à 20°C;

M : poids moléculaire;

T : température absolue en KELVIN;

μ : s'exprime dans ces conditions en centipoises.

Les composés contenant le soufre, l'azote ne peuvent être traités. (11)

Tableau donnant la contribution des groupements pour l'évaluation de A et de B dans l'équation d'orrick et ERBAR.

Groupement	A	B	Groupement	A	B
$\begin{array}{c} R \\ \\ -C- \\ \\ R \end{array}$	-0,15	35	Brome	-1,25	365
$\begin{array}{c} R \\ \\ R-C-R \\ \\ R \end{array}$	-1,20	400	Iode	-1,75	400
Double-Liaison	0,24	-90	-OH	-3,00	1600
Cycle à 5 C	0,10	32	-COO-	-1,00	420
Cycle à 6 C	-0,45	250	-O-	-0,38	140
Cycle aromat.	0	20	>C=O	-0,50	350
Subst-Ortho	-0,12	100	-COOH	-0,90	770
Subst-Méta	0,05	-34	* Carbone atomique	$-(6,95 + 0,21n)$	$275 + 99n$
Subst-Para	-0,01	-5			
Chlore	-0,61	220			

* n: nombre de carbones non inclus dans les groupements cités.

a) corrélation de THOMAS:

Pour une température au dessous du point d'ébullition, THOMAS a proposé de calculer le coefficient de viscosité par la relation:

$$\text{Log}_{10} \left[\frac{8,569 \mu}{\sqrt{\rho}} \right] = \Theta \left[\frac{1}{T_r} - 1 \right]$$

μ : centipoises

ρ : g/cm³ à 20°C

Θ : constante de viscosité calculée à partir du tableau suivant

Groupement	Θ	Groupement	Θ
C	-0,462	Double-Liaison	0,478
H	0,249	C ₆ H ₅ -	0,385
O	0,054	S	0,043
Cl	0,340	CO [cétones esters]	0,105
Br	0,326	CN nitriles	0,381

Les erreurs sont variables, mais généralement indiquent que les aromatiques (sauf le benzène) monohalogénés, ceux ayant un haut poids moléculaire et les normales paraffines peuvent être traités.

Cette méthode n'est cependant pas utilisable pour les alcools, les acides, les naphthènes, les hétérocycles, les amines, les aldéhydes et les aromatiques multi-halogénés.

c) corrélation de MORRIS :

$$\text{Log}_{10} \frac{\mu}{\mu^*} = J \left[\frac{1}{T_r} - 1 \right]$$

* : viscosité au point critique et peut être interprétée comme une constante

empirique et elle est constante pour chaque famille de composés.

J : paramètre qui se calcule de la façon suivante;

$$J = \left[0,0577 + \sum_i (b_i n_i) \right]^{1/2}$$

Avec b_i : contribution des groupements.

n_i : nombre d'apparition du groupement dans le composé.

Cette relation n'est applicable que pour T_r petits.

Tableau donnant μ^* pour chaque famille de composés.

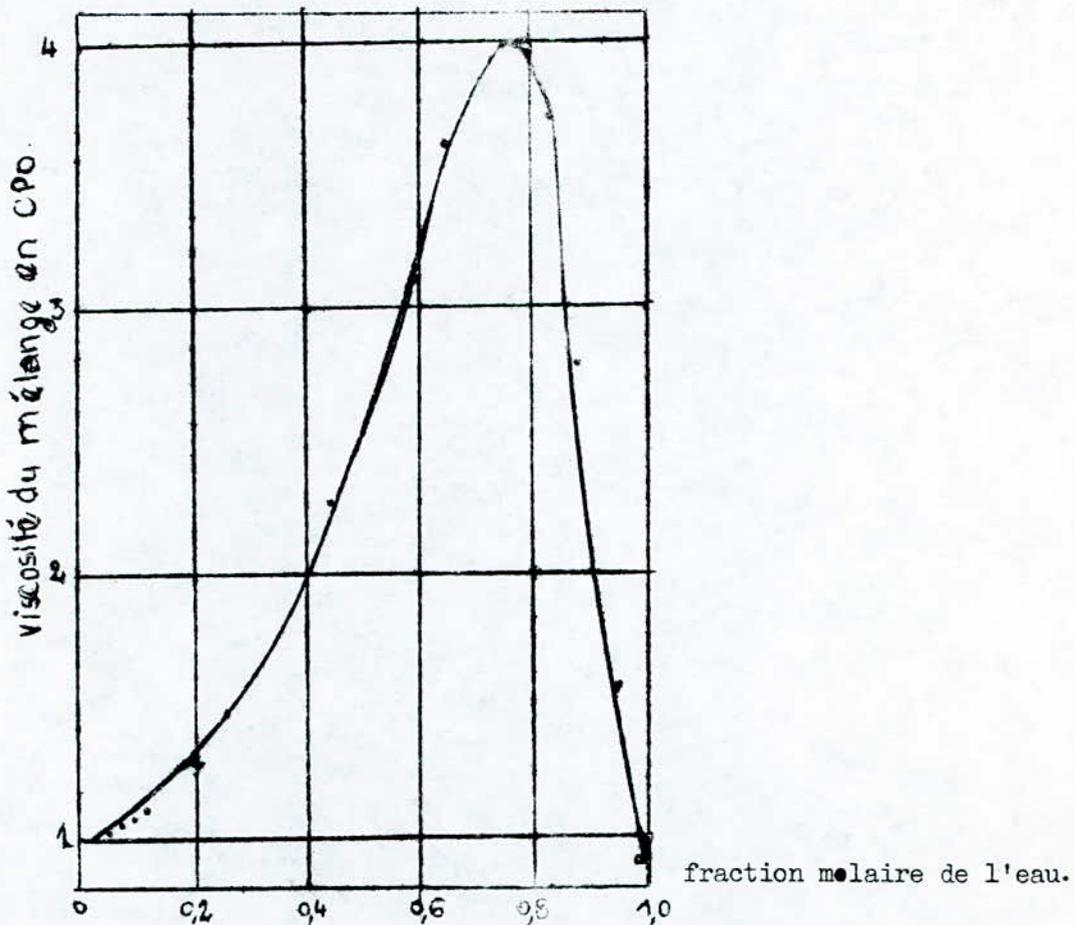
Famille de composé	μ^* (CPO)
Hydrocarbures	0,0875
Hydrocarbures halogénés	0,148
Dérivés du benzène	0,0895
Dérivés halogénés du benzène	0,123
Alcools	0,0819
Acides organiques	0,117
Esters, cétones, aldéhydes acétates	0,096
Phénols	0,0126
Divers hétéroatomes	0,10

Tableau donnant des b_i pour calculer J :

Groupement	b_i	Groupement	b_i
CH ₃ , -CH ₂ - , -CH-	0,0825	CH ₂ DANS un cycle	0,1707
-CH ₃ : halogéné (subst)	0,00	CH ₂ , CH ₂ , CH substitués dans un cycle	0,0520
-CH ₂ :	0,0895	NO ₂ dans un cycle	0,4170
-CH :	0,0667	NH ₂ dans un cycle	0,7645
C :	0,00	OH dans les alcools	2,0446
Brome	0,2058	COOH DANS les acides	0,8896
Cl	0,1470	C=O dans les cétones	0,3217
F	0,1344	O-C=O dans acétates	0,4368
I	0,1908	OH dans les phénols	3,4420
Double-Liaison	-0,0742	-O- dans les éthers	0,1090
Cycle benzénique	0,3558	F, Cl dans un cycle	0,00
Hydrogène dans un cycle	0,1446		

IV - 3 - 2 : MELANGES DES LIQUIDES :

La viscosité en fonction de la composition à basse température ne peut être estimée avec précision sauf si les propriétés des constituants purs sont disponibles. Au dessous de $T_r = 0,75$, c'est à dire à basse température; la viscosité du mélange est très sensible à la structure du liquide qui est en étroite liaison avec la composition. Pour illustrer ceci, on prend l'exemple d'une solution de N,N-diméthylacétamide dans l'eau. Figure ci-dessous.



Viscosité du N,N-diméthylacétamide dans l'eau à 24°C.

On remarque cette figure que la courbe représentative de la variation de la viscosité (dynamique) en fonction de la composition passe par un maximum; c'est le cas où l'un des constituants est polaire ou s'il existe une large gamme d'association entre les constituants du mélange.

Dans le cas particulier du N,N-diméthylacétamide qui est considéré comme polaire quand l'eau lui est fortement associée.

Le maximum de viscosité a été interprété par PETERSEN comme étant dû à la résonance structurale du groupement carbonyle du fait de la double liaison oxygène - carbone.

La majorité des mélanges possédant un tel caractère peuvent être de la même manière.

Pour discuter qualitativement le concept de la viscosité d'un mélange binaire de deux corps A et B; il est à noter que les interactions moléculaires peuvent être du type A-A; B-B et A-B; ces interactions vont donc déterminer les constantes du mélange. La meilleure approche est celle du modèle d'EYRING qui met en évidence les différentes transitions possibles des molécules entre les différentes couches du fluide : le mouvement des molécules de A par exemple de cette manière peut être traité comme étant l'évolution d'une réaction chimique et la répulsion ou l'attraction dans ce mouvement de molécules font engendrer une barrière de potentiel qu'est l'énergie libre G^* . La description de ce mécanisme a conduit à une relation similaire à celle d'EYRING et ANDRADE:

$$\mu = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$

où A et B sont des constantes. T étant la température absolue.

Cette relation s'écrit :

$$\mu = \frac{hN_0 \rho}{M} \exp\left(\frac{\Delta G^*}{RT}\right) = \frac{hN_0 \rho}{M} \exp\left(-\frac{\Delta S^*}{R}\right) \exp\left(\frac{\Delta H^*}{RT}\right)$$

le terme $\frac{hN_0 \rho}{M} \exp\left(-\frac{\Delta S^*}{R}\right)$ équivaut à A et $\frac{\Delta H^*}{R}$ à B dans l'équation générale d'EYRING et ANDRADE.

où ΔG^* est l'énergie de GIBBS; ΔH^* l'enthalpie et ΔS^* l'entropie d'activation dans le processus de translation des molécules à travers les couches fluides. (11)

et h est la constante de PLANCK.

N_0 est le nombre d'AVOGADRO.

M étant la masse moléculaire

ρ est la masse volumique.

a) corrélation de LOBE:

Pour les mélanges binaires, LOBE exprime la viscosité cinématique par la relation suivante :

$$\nu_m = \phi_A \nu_A e^{\phi_B \alpha_B^*} + \phi_B \nu_B e^{\phi_A \alpha_A^*}$$

$$\text{avec: } \alpha_A^* = \frac{\alpha_A}{RT} \quad ; \quad \alpha_B^* = \frac{\alpha_B}{RT}$$

α_j = viscosité caractéristique pour le constituant j dans le mélange en cal/g.mole.K

ϕ_j = fraction en volume de j .

$R = 1,987$ cal/g.mol.K (constante des gaz)

T : température, K

b) ON peut aussi appliquer la relation générale :

$$f(H_m)_m = \sum_i \sum_j (x_i \cdot x_j \cdot f(H_{ij})_m)$$

$$\text{ou encore par la relation } f(H_m)_l = \sum_i x_i \cdot f(H_i)_l$$

f dans ces deux relations peut être $H_L; \ln H_L; \frac{1}{H}$ etc.

x_i peut être pris comme étant la fraction volumique; massique ou fraction molaire.

**PARTIE
EXPERIMENTALE**

I N T R O D U C T I O N

L'objectif de notre travail, consiste en deux parties essentielles :

La première partie concerne l'étude de l'influence de la température sur la viscosité des liquides purs tels que :

- la glycérine.
- L'eau distillée.
- Le benzène.
- Le toluène.

Nous essayons ensuite, dans la même partie, d'utiliser quelques corrélations citées dans la partie théorique, afin de calculer la viscosité de chaque liquide précité et ainsi faire une comparaison avec les résultats obtenus expérimentalement.

La deuxième partie, a été consacrée à l'étude de:

- L'influence de la concentration sur la viscosité, à température constante.
- L'influence de la température sur la viscosité, à concentration constante.

et ce pour différentes solutions aqueuses de sels minéraux (chlorure de sodium, chlorure de potassium, chlorure de calcium) , ainsi que pour la solution aqueuse de saccharose

APPAREILLAGE :

Les mesures ont été effectuées avec un VISCOSIMETRE A CHUTE DE BILLE PROLABO AFNOR 42 - 011 .

Cet appareil est destiné à mesurer la viscosité des liquides entre 1 et 20 000 centipoises. Il fonctionne comme suit : le liquide étudié est contenu dans un tube calibré incliné sur la verticale de 30° (selon la norme française NF T 42 - 011/ 69) ; on mesure le temps de chute d'une bille calibrée entre deux traits repères du tube d'où l'on déduit la viscosité d'après la formule suivante :

$$\mu = Kt(D - d) \text{ en poises.}$$

d est la densité du liquide à la température de mesure;

D " de la bille utilisée (g/cm^3)

K est la constante d'étalonnage de la bille

t est le temps de chute de la bille (secondes)

Remarque: Les valeurs de K et de D sont délivrées sur certificat par le constructeur .

Description de l'appareil :

L' appareil schématiquement est un tube calibré assujéti dans l'axe d'une enveloppe cylindrique en verre destinée à maintenir le système tube - liquide - bille à température constante. un thermomètre est fixé sur la monture. L'ensemble pivote autour d'un axe devant un large cadran gradué muni de butées réglables "D" et un index " R ". Une vis moletée " E " située en bas du cadran permet de bloquer ce système en toute position.

Le dispositif est soutenu par un statif émaillé muni de vis calantes et d'un niveau à bulle " N " .

L' appareil dispose de trois billes de diamètres respectifs: 10; 11,6 et 11,9 mm . Elles sont placées dans logements " F " du socle.

MODE ' D'EMPLOI :

1 - On place sous chaque pied un disque amortisseur et à l'aide des vis calantes on établit l'horizontabilité du statif; on s'assurera de ceci par l'intermédiaire du niveau à bulle.

2 - On ajuste les butées " D " pour une inclinaison de 30° vers la droite et

vers la gauche ; pour fixer cette graduation vers la droite on fait basculer le tube pour amener celle-ci en face de l'index " R ", la butée de gauche doit être au contact du bras gauche du support et on la bloque. Pour fixer celle de gauche on procédera de la même manière en fixant la butée de droite au contact du bras droit du support.

3 - On verse le liquide à essayer dans le tube et on y introduira la bille convenable ; on attendra que le liquide se débulle parfaitement et on met en place le bouchon à champignon débulleur " P " : l'air est chassé et un excès de liquide monte au dessus de ce champignon, à la fin on placera le couvercle.

MESURE :

1 - On contrôle la température de mesure et on basculera le tube vers la droite la bille commence à descendre dans le tube, on comptera le temps entre les deux traits repères du tube ; idem pour la position de gauche.

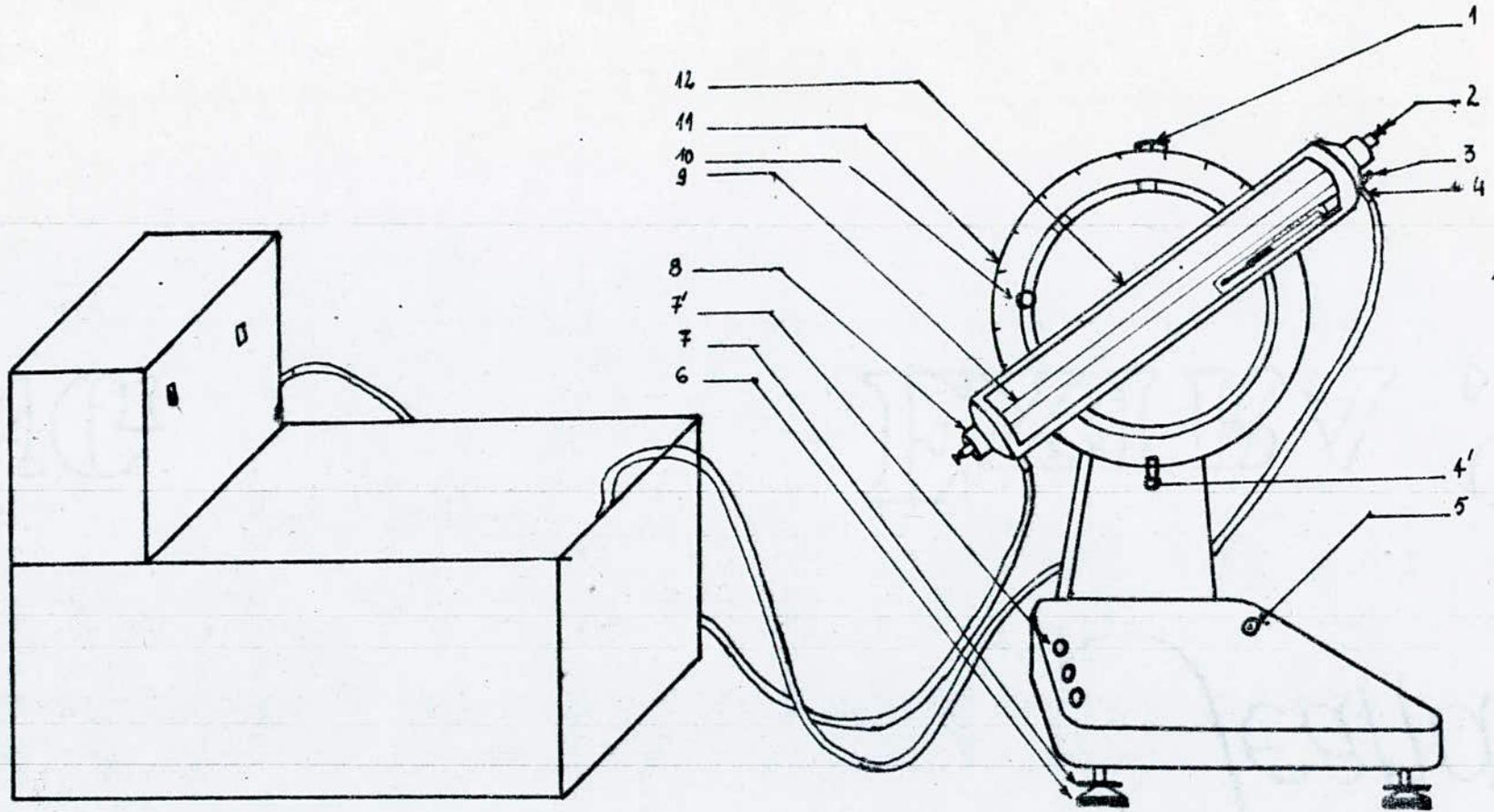
On prendra le temps moyen de plusieurs essais.

Remarque : Si le liquide à l'essai est transparent ; on pointera le passage de la bille en visant la base de son contour. Si le liquide est plus opaque on visera son diamètre qui apparaît comme une ligne brillante.

Tableau donnant les valeurs de la constante d'étalonnage K pour chaque bille et son diamètre D

N° du viscosimètre	64100		
Diamètre de la bille D (mm)	11,9	11,6	10
Domaine d'utilisation (cPo)	1 à 50	50 à 2000	2000 à 20 000
Masse volumique de la bille (g/cm ³)	7,88	7,88	7,88
Constante d'étalonnage K	0,0000947	0,001059	0,0405

Schéma de l'appareillage.



Bain thermostatique à circulation d'eau.

viscosimètre à chute de bille

LEGENDE

- | | |
|--------------------------|-------|
| 1 - Index | " R " |
| 2 - Bouchon à champignon | " P " |
| 3 - Thermomètre | |
| 4 - Tétine | " T " |
| 4' - Vis moletée | " E " |
| 5 - Niveau à bulle | " N " |
| 6 - Disque amortisseur | |
| 7 - Vis calante | |
| 7' - Logement des billes | |
| . | |
| 8 - Couvercle | |
| 9 - Tube calibré | |
| 10 - Butée réglable | " D " |
| 11 - Cadran gradué | |
| 12 - Enveloppe en verre | |

PRODUITS UTILISES:1 - LA GLYCERINE : $C_3H_8O_3$: bidistillée PROLABO .poids moléculaire: $M = 92,1$ Température d'ébullition : $T_{éb} = 287 \text{ } ^\circ\text{C}$.densité $d_4^{20} = 1,255 - 1,26$.2 - LE BENZENE : C_6H_6 :POIDS MOLECULAIRE: $M = 78$ Température d'ébullition $T_{éb} = 80,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ Température critique $T_c = 290,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ Densité $d_4^{20} = 0,879$ 3 - LE TOLUENE : C_7H_8 :Poids moléculaire : $M = 92,14$ Température d'ébullition $T_{éb} = 112 \text{ } ^\circ\text{C}$ Température critique $T_c = 321 \text{ } ^\circ\text{C}$ Densité $d_4^{20} = 0,860$ 4 - LE CHLORURE DE CALCIUM ANHYDRE : $CaCl_2$:Poids moléculaire : $M = 111,1$ Solubilité dans l'eau: $S = 42\%$ à $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ (en poids)5 - LE CHLORURE DE SODIUM : $NaCl$:Poids moléculaire: $M = 58,45$ Solubilité dans l'eau: $S = 35,9\%$ (en poids) à 20°C .6 - LE CHLORURE DE CALCIUM : KCl :Poids moléculaire: $M = 74,56$ Solubilité dans l'eau: $S = 34,2\%$ (en poids) à 20°C

7 - LE SACCHAROSE: $C_{12} H_{22} O_{11}$:Poids moléculaire : $M = 342,3$ Solubilité dans l'eau : $S = 200$ / (en poids) à $20^{\circ}C$

III - RESULTATS EXPERIMENTAUX

A- Liquides purs:

1 - Influence de la température:

Les tableaux 1,2,3 et 4 résument l'ensemble des résultats relatifs à l'influence de la température sur la viscosité de la glycérine, de l'eau, du benzène et du toluène.

Exemple de calcul:

- Cas de la glycérine:

$$T = 10^{\circ}\text{C} ; d_4^{10} = 1,2578 ;$$

La bille utilisée: 11,6 mm; $K = 0,001059$, $D = 7,88\text{g/cm}^3$, temps moyen de la chute de la bille = 3216s .

$$\mu = Kt(D - d_4^{10}) = 0,001059 \times 3216(7,88 - 1,2578) = 22,55352 \text{ Poises}$$

$$\mu = 2255,352 \text{ cPo .}$$

La variation de la viscosité en fonction de la température pour chaque liquide étudié est représentée sur les figures (1-a,2-a,3-a et 4-a). L'allure générale est hyperbolique indiquant que la viscosité décroît quand la température croît.

Dans le cas de la glycérine qui est une substance visqueuse; une légère augmentation de la température entrainera une chute brusque de la viscosité.

Pour l'eau, le benzène et le toluène cet effet est plus au moins uniforme .

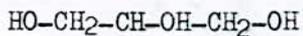
2 - Calcul de la viscosité par les corrélations:

- Glycérine :

Corrélation d'ORRICK & ERBAR :

$$\ln \frac{\mu}{\rho M} = A + B/T \quad M = 92,1 ; \rho = 1,26 .$$

-- Calcul de A et B :



$$A = -6,95 - 0,21n + 3(\text{OH}) = -6,95 - 0,21(3) + 3(-3) = -16,58$$

$$B = 275 + 99n + 3(\text{OH}) = 275 + 99(3) + 3(1600) = 5372$$

$$\text{d'où : } \ln \frac{\mu}{1,26 \times 92,1} = -16,58 + 5372/T .$$

à $T = 293 \text{ K}$

$$\ln \frac{\mu}{116,046} = 1,754 \Rightarrow \mu = 670,791 \text{ cPo}$$

Influence de la température sur la Viscosité.

Tab. 1 : G, cérine.

T (°C)	t _{moyen} (s)	$\Delta \bar{T}_4$	μ (C.P.)
10	3216	1,2578	2255,352
15	1920	1,2572	1346,600
20	1118	1,2567	784,174
25	786	1,2542	551,520
30	510	1,2528	357,928
35	367	1,2517	257,611
40	266	1,2498	186,770
45	183	1,2479	128,530
50	142	1,2406	99,842
55	110	1,2362	77,394
60	87	1,2323	61,250
65	71	1,2290	50,010
70	58	1,2244	40,880
75	46	1,2235	32,430
80	38	1,2206	26,800
85	30	1,2154	21,175

Tab. 2 : L'eau.

T (°C)	t _{moyen} (s)	$\Delta \bar{T}_4$	μ (C.P.)
15	18,5	0,9993	1,2055
20	16,6	0,9982	1,0818
25	15,3	0,9971	0,9973
30	14,5	0,9957	0,9453
35	13,6	0,9940	0,8868
40	13,2	0,9922	0,8610
45	12,6	0,9903	0,8221
50	12	0,9881	0,7832
55	11,8	0,9875	0,7702
60	11,6	0,9832	0,7576

Tab.3 : Benzène.

T (°C)	Δ_4^T	t.moyen (s)	μ cPo
15	0,8821	12,5	0,8284
20	0,8790	11,7	0,7757
25	0,8759	11,4	0,7561
30	0,8728	11	0,7299
40	0,8666	10,5	0,6974
45	0,8635	10,3	0,6844
50	0,8604	10	0,6647
60	0,8542	9,9	0,6587

Tab.4 : Toluène.

T (°C)	Δ_4^T	t.moyen(s)	μ cPo
15	0,8632	11,3	0,7509
20	0,8600	11	0,7313
30	0,8535	10,5	0,6987
40	0,8470	10,3	0,6860
50	0,8405	9,9	0,6599
60	0,8340	9,6	0,6405
70	0,8275	9,4	0,6278
80	0,8210	9,3	0,6217

fig. 1.2:
Variation de la viscosité de la Glycérine.
en fonction de la température

$$\mu = f(T^{\circ}\text{C}).$$

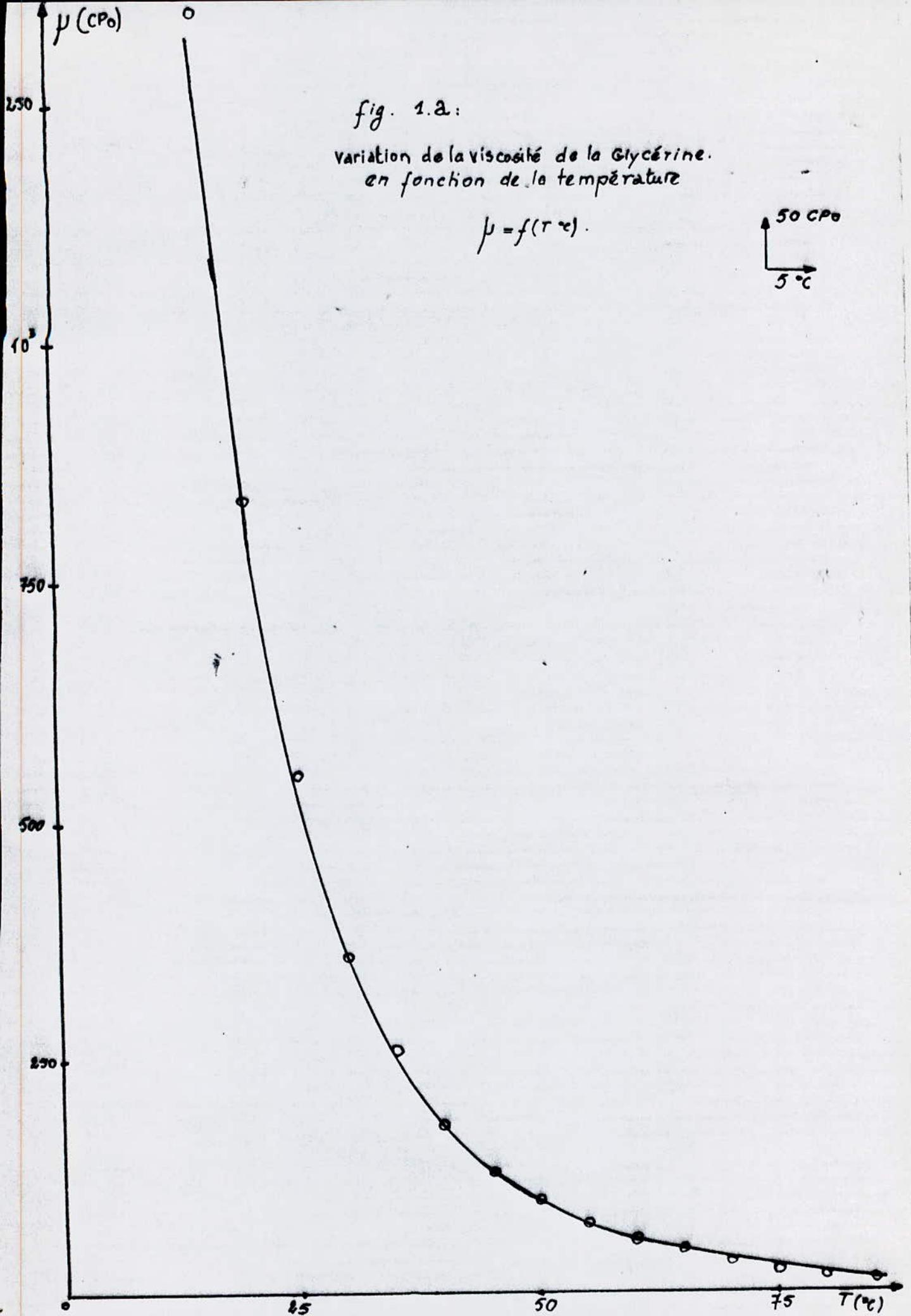
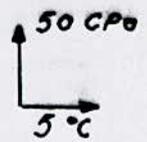


fig: 2a :

variation de la viscosité de l'eau distillée en fonction
de la température $\mu = f(T(^{\circ}C))$

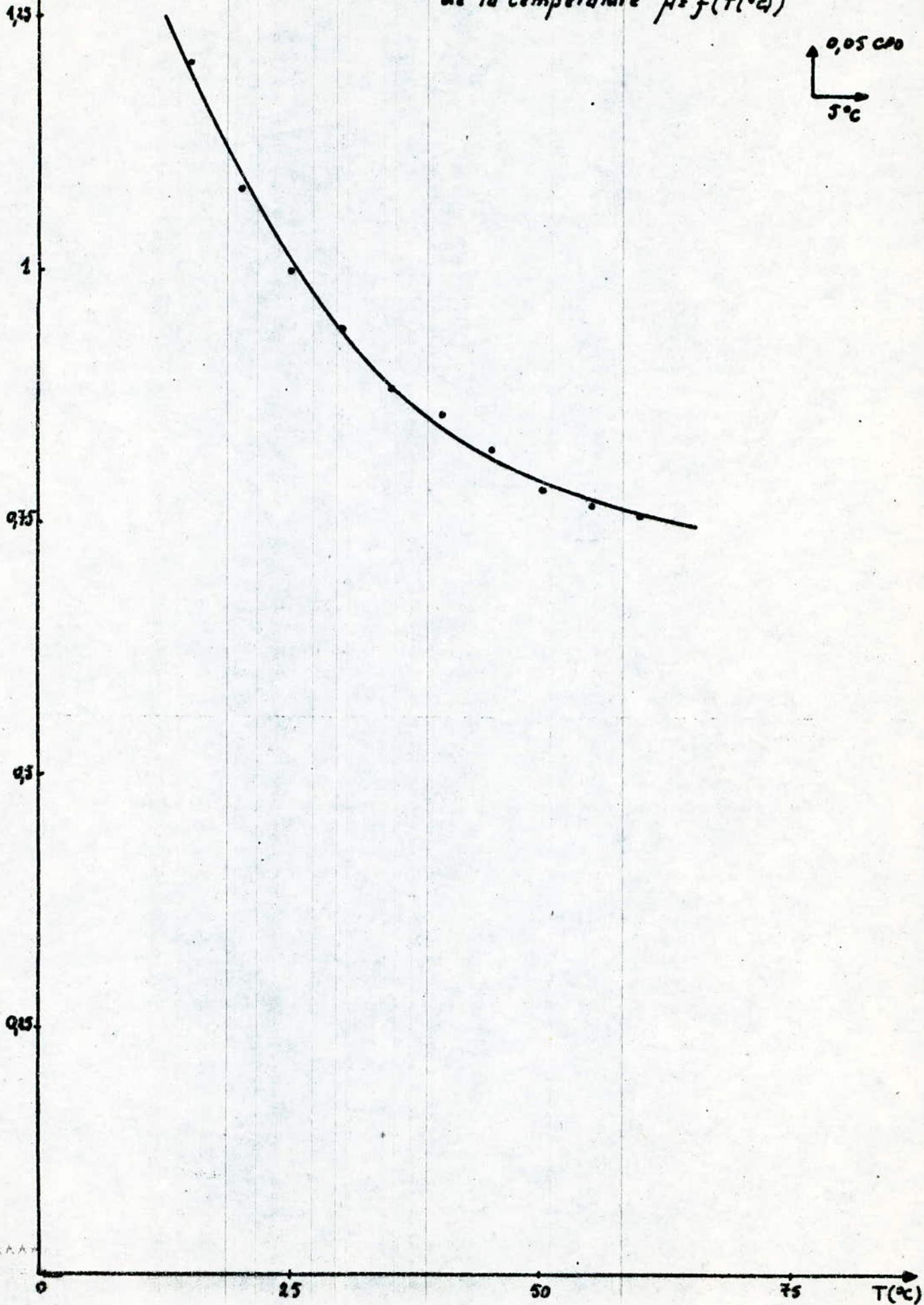


fig. 3a:

variation de la viscosité du Benzène en fonction de la température:

$$\mu = f(T(^{\circ}\text{C})).$$

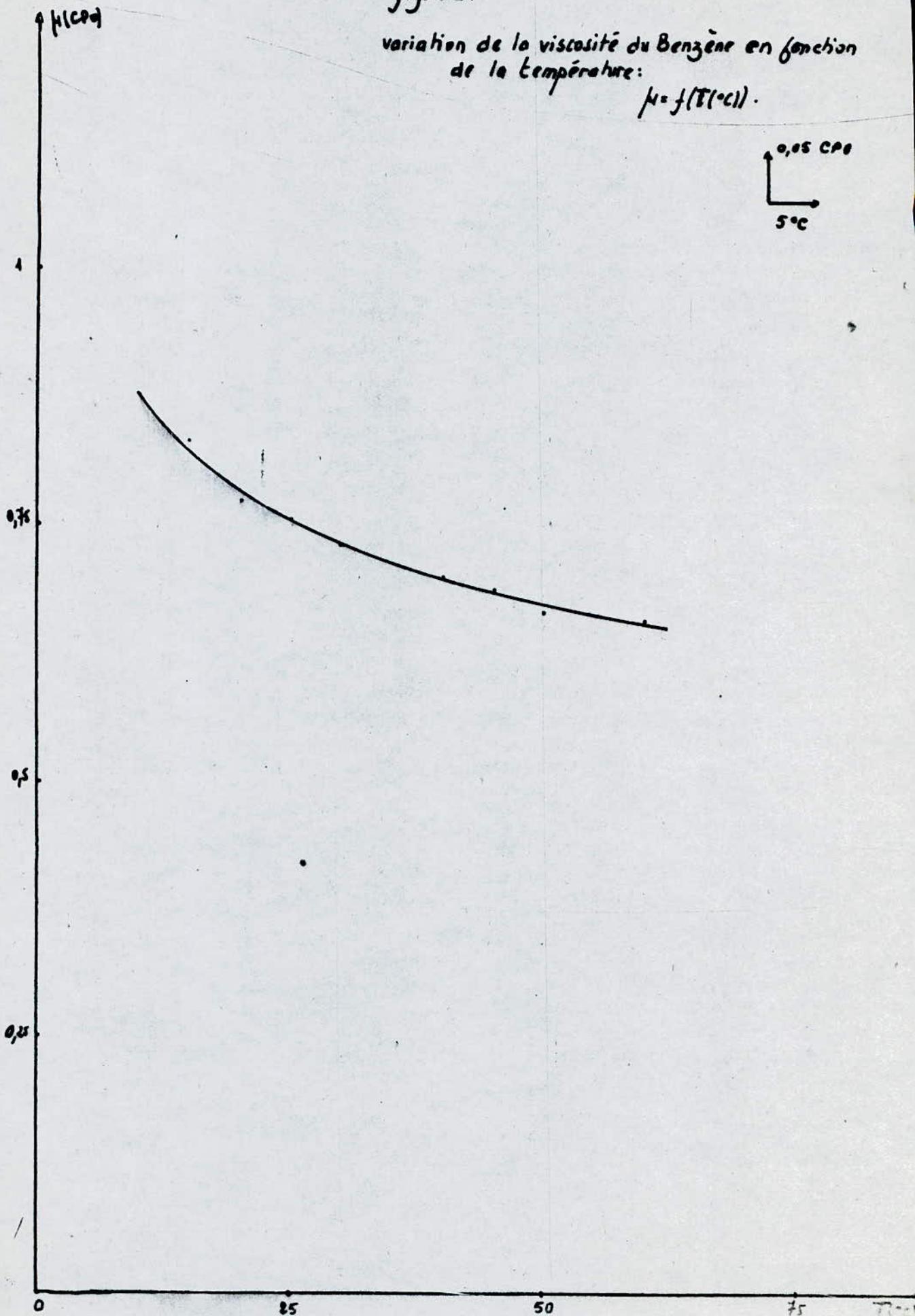
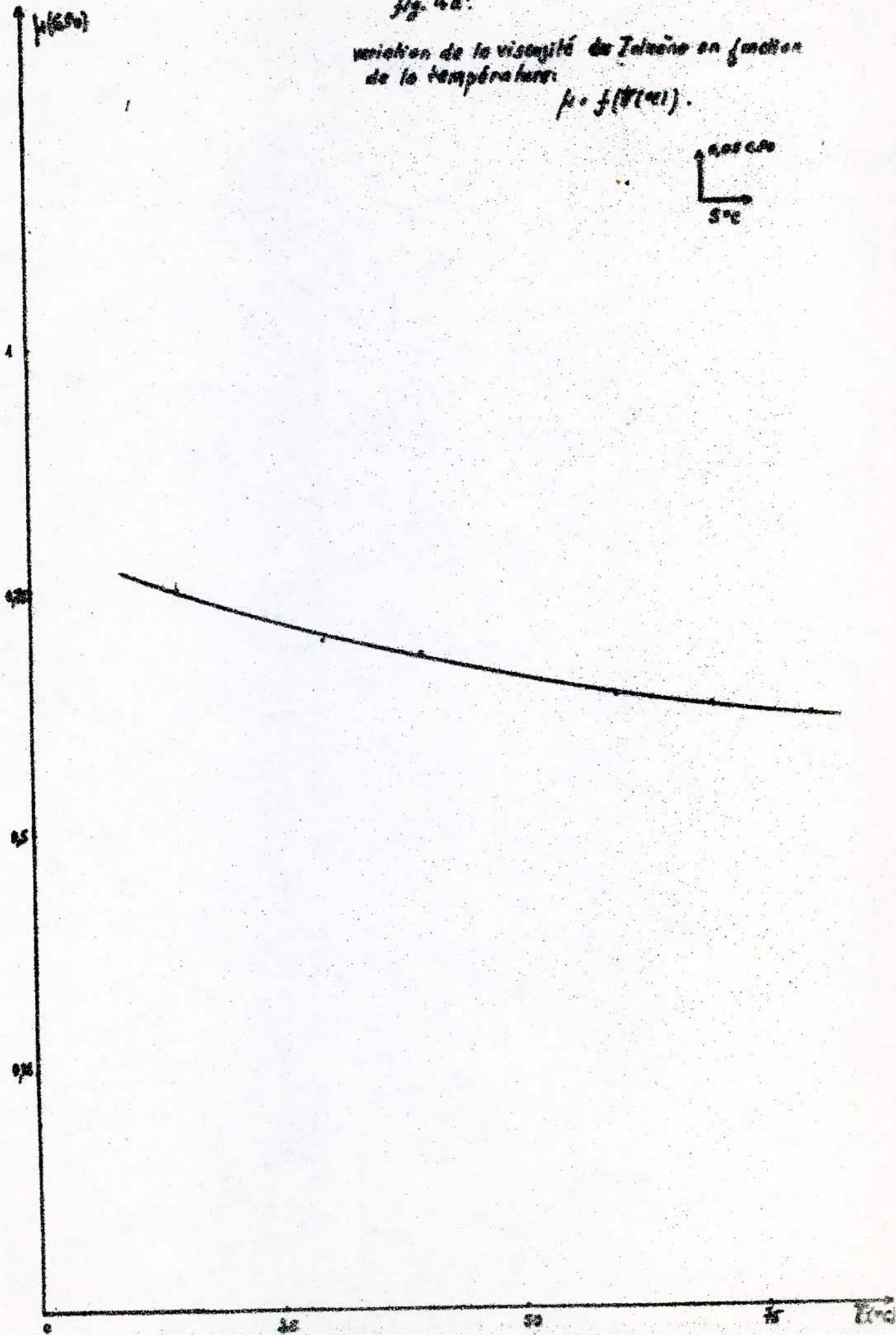


fig. 4a.

variation de la viscosité de Toluène en fonction de la température:

$$\mu = f(T(^{\circ}C)).$$



L'écart en pourcentage entre cette valeur et celle issue de l'expérimentation est cependant :

$$E = \frac{\mu_{\text{exp}} - \mu_{\text{cal}}}{\mu_{\text{cal}}} \cdot 100 = \frac{784,17 - 670,791}{670,791} \cdot 100 = 14,56$$

le tableau 5 résume le reste des calculs .

Eau distillée :

On utilisera à titre comparatif la corrélation de CRAGOE citée dans " LANGE'S HANDBOOK of CHEMISTRY " 13^e édition . Cette relation applicable dans le domaine entre 15 et 60°C . Elle s'écrit :

$$\log \frac{\mu}{\mu_{20}} = \frac{1,2348, (20 - T(^{\circ}\text{C})) - 0,001467(T(^{\circ}\text{C}) - 20)^2}{T(^{\circ}\text{C}) + 96}$$

Exemple de calcul :

à T = 25°C on trouve $\mu = 0,8840$ cPo

L'écart E = 10,9 .

Le tableau 5 résume les autres résultats de calcul .

Benzène :

Corrélation de MORRIS : $\log_{10} \frac{\mu}{\mu^*} = J \left(\frac{A}{T_r} - 1 \right)$

pour cette famille de composés $\mu^* = 0,0895$ cPo .

$$J = (0,0577 + \sum b_i n_i)^{1/2}$$

$\sum b_i n_i =$ se calcule comme suit : selon le tableau donnant les contributions de groupements :

$\text{C}_6\text{H}_4 + 2\text{H}$ (Substitués au noyau benzénique)

$$0,3558 + 2(0,1446) = 0,7116 \text{ d'où } J = 0,8771$$

à 20°C $\mu = 0,5715$ avec un écart E = 26,32

LES autres résultats de calculs sont portés dans le tableau 7 .

Toluène :

Corrélation de MORRIS :

On procédera comme dans le cas du benzène avec la substitution d'un hydrogène par un méthyle .

Les autres résultats

Le tableau 8 comporte l'ensemble des calculs .

Calcul de la Viscosité par les corrélations.

Tab.5: Glycérine.

T(°C)	μ_{exp} (CPO)	μ_{cal} (CPO)	Ecart (%)
10	2255,352	1282,182	43,15
15	1346,600	922,202	31,52
20	784,174	670,731	14,36
25	551,520	493,133	10,58
30	357,928	366,266	2,83
35	257,611	274,663	6,62
40	186,770	207,873	11,30
45	128,530	158,708	23,48
50	99,842	122,189	22,38
55	77,394	94,825	22,52
60	61,250	74,152	21,07
65	50,010	58,409	16,80
70	40,880	46,330	13,33
75	32,430	36,994	14,03
80	26,800	29,729	10,93
85	21,173	24,036	13,52

Tab.6: l'eau.

T(°C)	μ_{exp} (CPO)	μ_{cal} (CPO)	Ecart (%)
15	1,2055	1,1358	5,9
20	1,0818	1,0000	7,6
25	0,9973	0,8885	10,8
30	0,9453	0,7939	16,1
35	0,8868	0,7479	19,0
40	0,8610	0,6518	24,3
45	0,8221	0,5959	27,6
50	0,7852	0,5460	30,3
55	0,7702	0,5034	34,6
60	0,7576	0,4639	38,7

Interprétation:

L'application des corrélations appropriées pour les différents liquides ayant de faible viscosité révèle l'existence d'un écart entre les valeurs expérimentales et théoriques devenant plus notable avec l'augmentation de la température donc la diminution de la viscosité: cas du benzène, toluène ou encore de l'eau.

Par contre pour les liquides visqueux tels que la glycérine; les écarts ne sont pas très significatifs. Ceci s'explique par le fait que expérimentalement l'appareillage est destiné pour la détermination de viscosité relativement élevée (1 à 20000 cPo) et théoriquement, la corrélation utilise la densité (d_4^{20}) donc des erreurs sont commises à mesure qu'on s'écarte de cette valeur.

Tab.7: Benzène.

T(°C)	μ_{exp} (CPO)	μ_{cal} (CPO)	Ecart (%)
15	0,8284	0,6109	26,26
20	0,7757	0,5715	26,32
25	0,7561	0,5357	29,15
30	0,7299	0,5030	31,10
40	0,6974	0,4463	36,00
45	0,6844	0,4215	38,41
50	0,6647	0,3988	40,00
60	0,6587	0,3589	45,51

Tab.8: Toluène.

T(°C)	μ_{exp} (CPO)	μ_{cal} (CPO)	Ecart (%)
15	0,7509	0,6050	19,43
20	0,7393	0,5679	22,34
30	0,6987	0,5342	23,54
40	0,6860	0,4498	34,43
50	0,6599	0,3844	41,75
60	0,6405	0,3665	42,78
70	0,6278	0,3337	46,85
80	0,6217	0,3056	50,85



Influence de la température et la Composition sur le système eau - glycérine

Tab. 8

T(°C)	fract. mol. Glycérine: X_1	0,855	0,747	0,663	0,442	0,269	0,164	0,109	0,052
	fract. mol. eau : X_2	0,145	0,253	0,337	0,558	0,731	0,836	0,891	0,948
45	d_4^T	1,2486	1,2284	1,2274	1,2205	1,1647	1,1559	1,0854	1,0568
	Temps moyen (s)	600	300	195	475	300	135	64,5	36
	μ (CPO)	421,36	211,32	137,35	29,94	17,11	8,61	4,15	2,33
30	d_4^T	1,2567	1,2154	1,2194	1,2155	1,1589	1,1275	1,0817	1,0529
	Temps moyen (s)	190	120	85	271	186	96	46	26
	μ (CPO)	133,67	84,69	58,55	17,10	11,84	6,14	2,96	1,68
50	d_4^T	1,2289	1,2019	1,2089	1,2063	1,1508	1,1195	1,0750	1,0436
	Temps moyen (s)	62	43	31	115	97	53	31	19
	μ (CPO)	43,67	30,41	21,30	7,33	6,18	3,39	1,87	1,23
80	d_4^T	1,2062	1,1907	1,1956	1,1913	1,1389	1,1045	1,0602	1,0201
	Temps moyen (s)	20	140	12	55	50	29	19	14
	μ (CPO)	14,15	9,92	8,49	3,48	3,19	1,86	1,23	0,91
Bille utilisée 11,5 mm				Bille utilisée 11,5 mm					

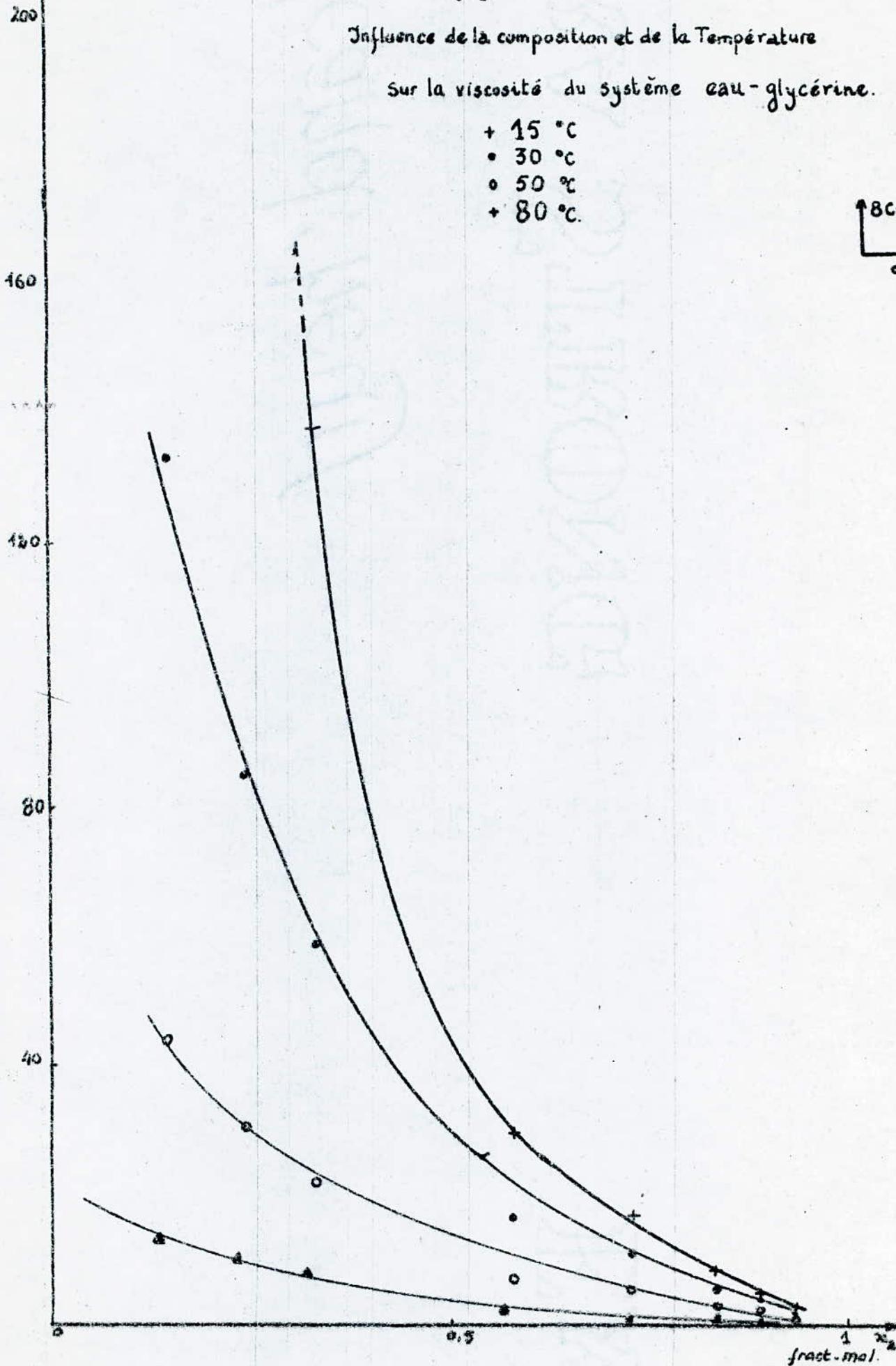
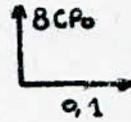
$\eta_{rel} (CP)$

fig: 3.2

Influence de la composition et de la Température

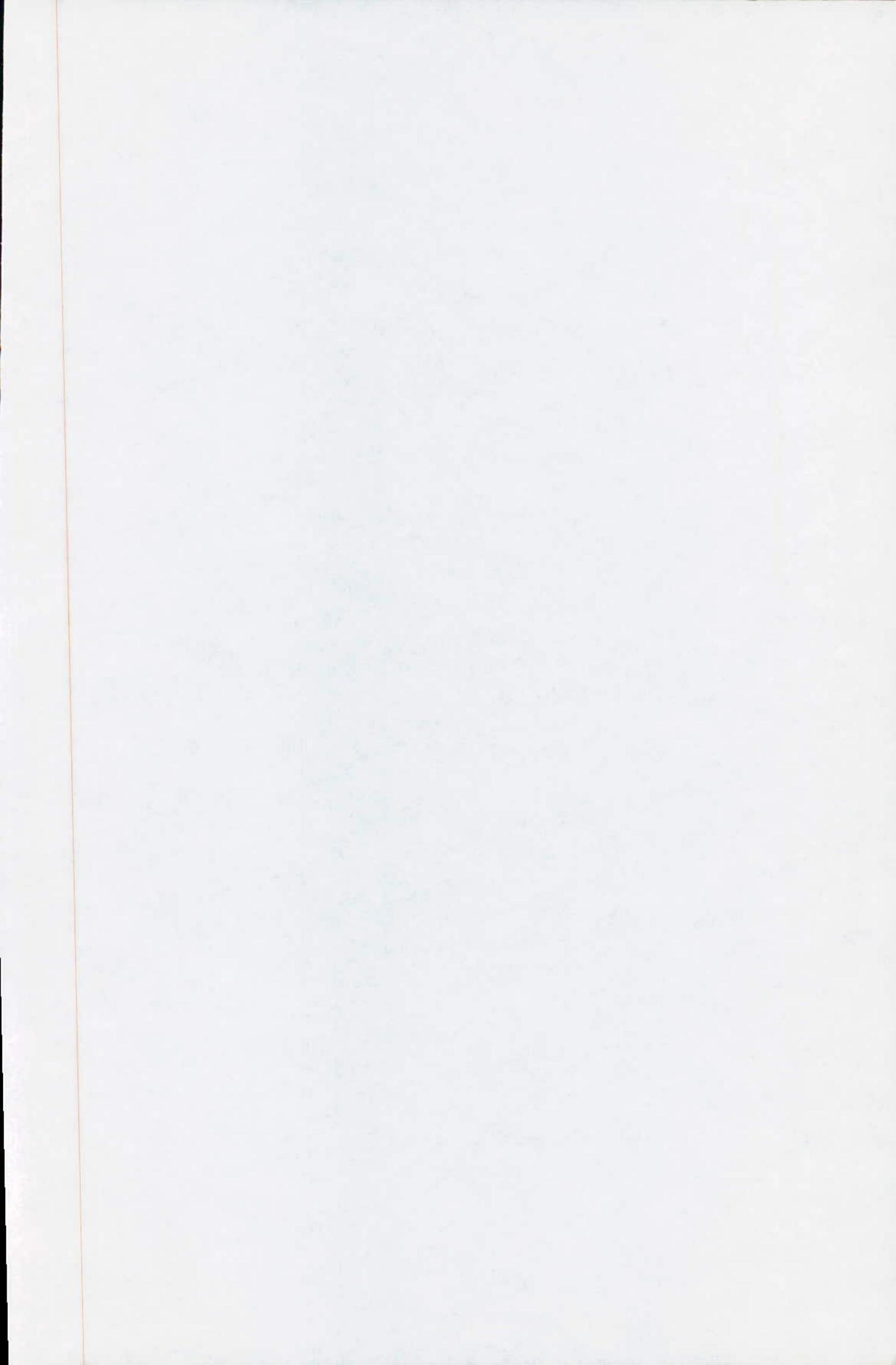
sur la viscosité du système eau-glycérine.

- + 15 °C
- 30 °C
- o 50 °C
- + 80 °C



Interprétation.

L'influence de la composition est illustrée par les valeurs expérimentales résumées sur le tableau 9 et portées graphiquement sur la figure 9-a montrant la diminution de la viscosité avec l'augmentation de la composition (exprimée en fraction molaire) et ceci à température constante .



Influence de la température et la Concentration
Sur la Viscosité.

Solution aqueuse de Chlorure de Sodium.

Tab. 10

T(°C)	C = 20 g/l.			C = 40 g/l.		
	t _{moyen} (s)	d _g	μ(cPo)	t _{moyen} (s)	d _g	μ(cPo)
15	20	1,0112	1,3040	21	1,0293	1,3626
20	19,5	1,0106	1,2835	19	1,0276	1,2329
25	17	1,0100	1,1060	17	1,0269	1,1035
30	16	1,0095	1,0440	16,5	1,0257	1,0740
35	15,5	1,0097	1,0095	15,5	1,0251	1,0662
40	14,5	1,0090	0,9436	14,5	1,0240	0,9414
50	12,8	1,0064	0,8332	13	1,0229	0,8442
60	12,4	1,0049	0,8074	12,5	1,0215	0,8419
70	11,5	1,0031	0,7499	12	1,0203	0,7795
80	11	1,0029	0,7165	11	1,0191	0,7147
T(°C)	C = 80 g/l.			C = 120 g/l.		
15	22,3	1,0511	1,4421	23	1,0695	1,4936
20	21	1,0502	1,3592	20	1,0674	1,2903
25	19,5	1,0496	1,2613	19,5	1,0669	1,1936
30	18	1,0498	1,1644	17	1,0661	1,0970
35	17	1,0479	1,0939	16	1,0656	1,0325
40	16	1,0467	1,0354	15,5	1,0650	1,0003
50	14,5	1,0441	0,9387	14	1,0622	0,9039
60	13,5	1,0428	0,8741	13,4	1,0614	0,8653
70	12,5	1,0421	0,8094	12,6	1,0607	0,8137
80	12	1,0417	0,7771	12	1,0597	0,7754
T(°C)	C = 140 g/l.			C = 200 g/l.		
15	23,4	1,0944	1,5053	25,5	1,1210	1,6322
20	20,5	1,0936	1,3194	23,9	1,1202	1,5286
25	19	1,0929	1,1896	21	1,1109	1,3462
30	17,3	1,0921	1,0944	20	1,1100	1,2822
35	16,2	1,0916	1,0430	19	1,1095	1,2192
40	15,5	1,0910	0,9980	19	1,1093	1,1841
50	14	1,0905	0,9045	16	1,1074	1,0262
60	13	1,0904	0,8373	14,8	1,1061	0,9494
70	12,5	1,0904	0,8053	13,9	1,1054	0,8953
80	12	1,0907	0,7731	13	1,1047	0,8541

fig: 10.3

variation de la viscosité en fonction de la température
 d'une solution aqueuse de chlorure de sodium à
 différentes concentrations: $\mu = f(T, C)$.

- C: 100 g/l
- + C: 50 g/l
- o C: 20 g/l

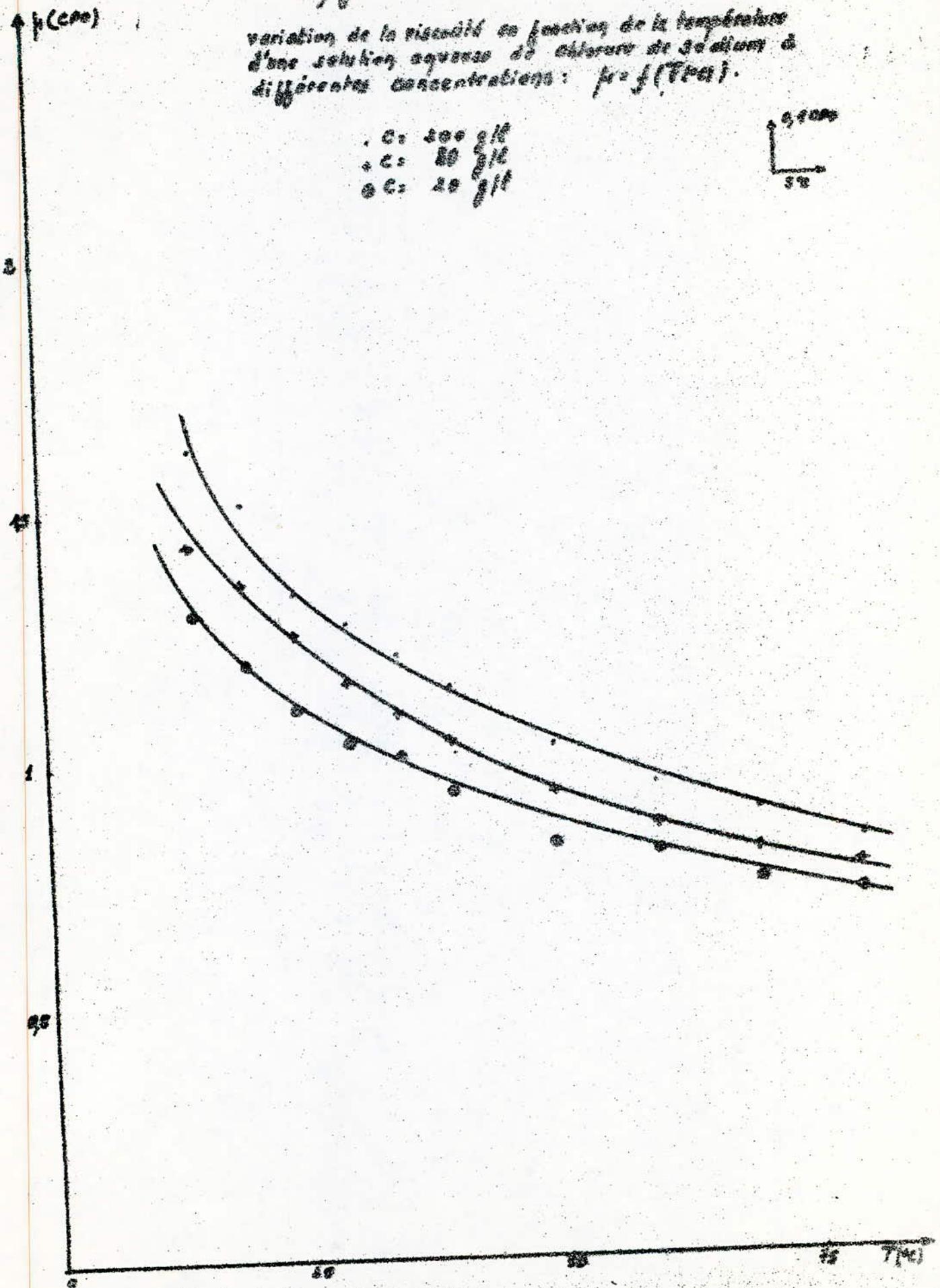
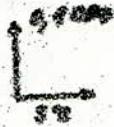
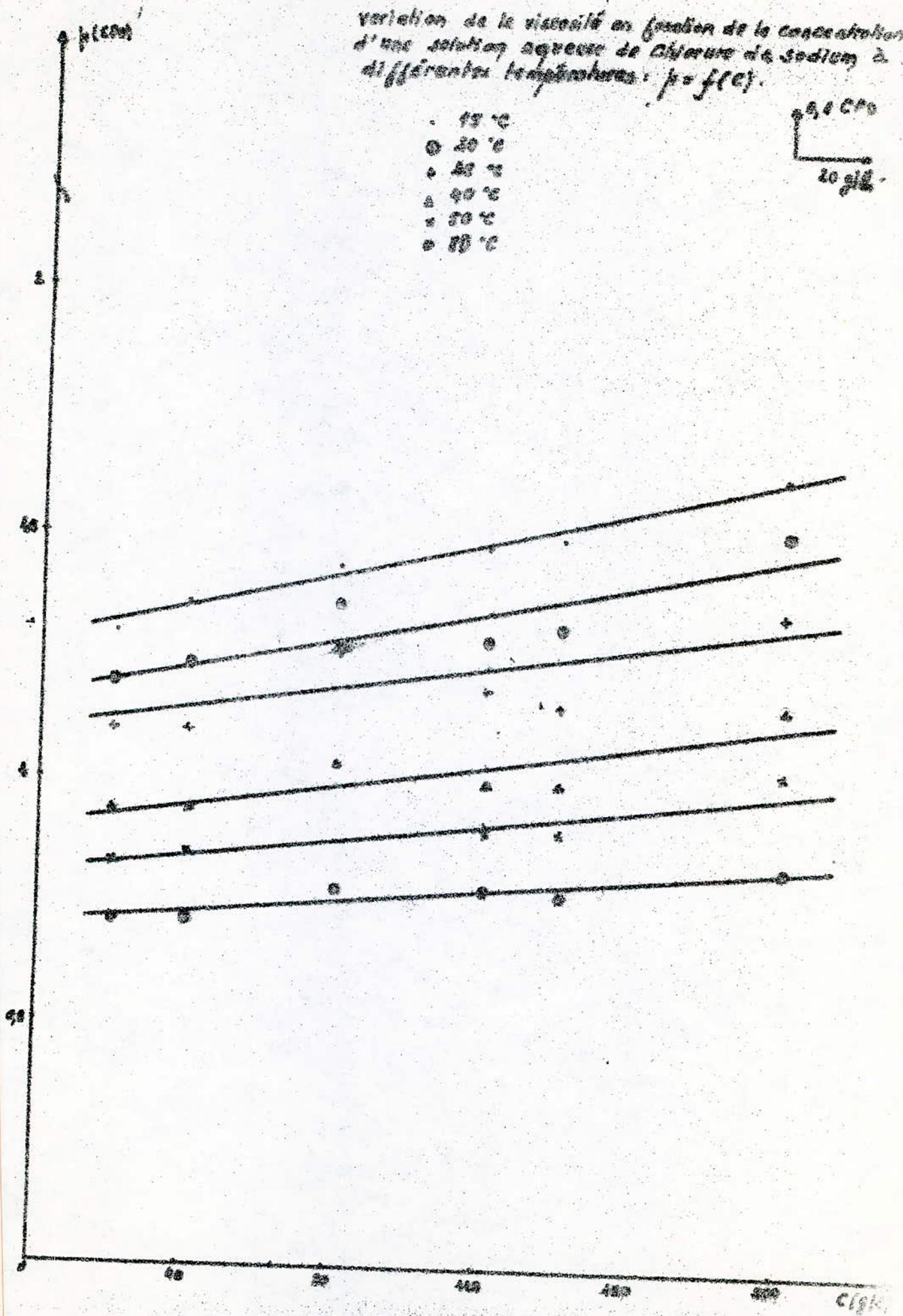


fig. 10. b

variation de la viscosité en fonction de la concentration
 d'une solution aqueuse de chlorure de sodium à
 différentes températures: $\eta = f(c)$.

- 15 °C
- ⊙ 20 °C
- 25 °C
- △ 30 °C
- 35 °C
- ⊙ 40 °C

0,4 CPO
 20 g/l



Influence de la température et la Concentration
sur la Viscosité .

Solution aqueuse de Chlorure de Potassium.

Tab. 11

T(°C)	C = 20 g/l .			C = 40 g/l .		
	t _{moyen} (s)	d ₄ ^T	μ(cPo)	t _{moyen} (s)	d ₄ ^T	μ(cPo)
15	17	1,0162	1,1110	19	1,0225	1,2340
20	16	1,0145	1,0170	18	1,0218	1,1690
25	15,7	1,0131	0,9755	17,2	1,0211	1,1172
30	14,4	1,0124	0,9365	15,5	1,0204	1,0069
35	13,8	1,0110	0,8977	14,5	1,0195	0,9420
40	13,2	1,0067	0,8592	13,6	1,0184	0,8837
50	12	1,0035	0,7914	13	1,0172	0,8449
60	11,3	1,0002	0,7556	12	1,0174	0,7900
70	10,9	1,0000	0,7101	11,5	1,0157	0,7476
80	10,3	0,9971	0,6714	10,8	1,0151	0,7021
T(°C)	C = 100 g/l			C = 140 g/l .		
15	19,5	1,0539	1,2864	20,6	1,0734	1,3278
20	18,2	1,0532	1,1701	18,6	1,0728	1,2119
25	17,4	1,0529	1,1250	17,8	1,0719	1,1476
30	16,4	1,0521	1,0605	16,9	1,0713	1,0897
35	15,2	1,0516	0,9930	16	1,0708	1,0317
40	14,4	1,0510	0,9312	15,6	1,0695	1,0061
50	13,4	1,0494	0,8668	14,7	1,0682	0,9483
60	12,4	1,0483	0,8022	13,8	1,0674	0,8909
70	11,7	1,0475	0,7570	13,4	1,0666	0,8647
80	11,4	1,0463	0,7377	12,8	1,0654	0,8261
T(°C)	C = 160 g/l .			C = 200 g/l .		
15	22,3	1,0861	1,4350	23,4	1,1030	1,5018
20	20,4	1,0852	1,3127	21,4	1,1023	1,3736
25	18,6	1,0846	1,1969	19,6	1,1015	1,2582
30	17,2	1,0839	1,1070	18	1,1009	1,1712
35	16,6	1,0831	1,0685	17	1,1000	1,1557
40	16	1,0824	1,0300	16,5	1,0985	1,0596
50	15,1	1,0811	0,9722	15,6	1,0978	1,0148
60	13,5	1,0800	0,8694	14,8	1,0968	0,9510
70	12,8	1,0797	0,8243	14	1,0956	0,8995
80	12,3	1,0791	0,7921	13	1,0945	0,8421

fig: 11.2

variation de la viscosité en fonction de la température
 d'une solution aqueuse de chlorure de potassium
 à différentes concentrations: $\mu = f(T(^{\circ}C))$.

- C. 200 g/l
- × C. 100 g/l
- C. 50 g/l
- △ C. 20 g/l

0,1 cP
 5°C

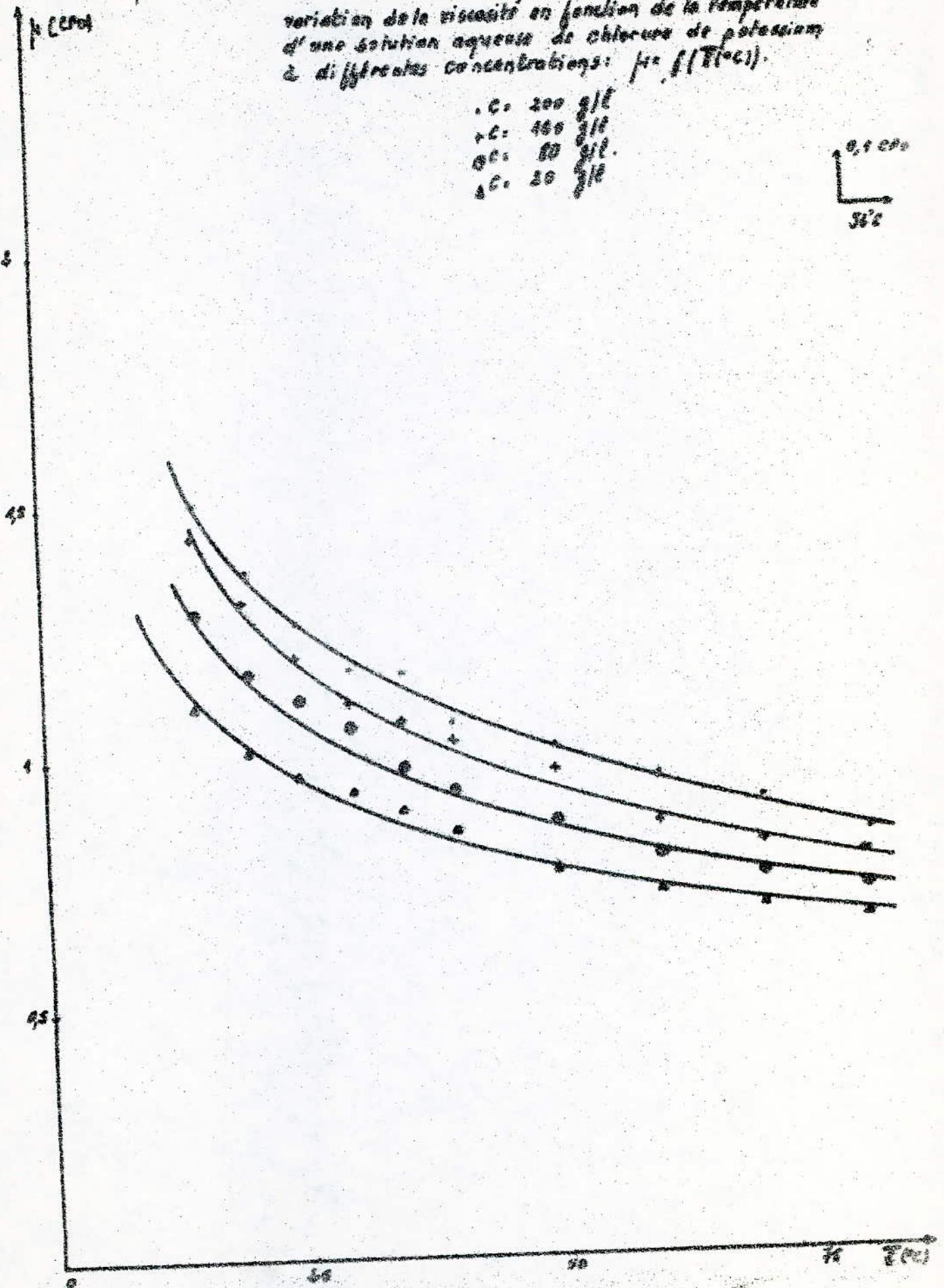
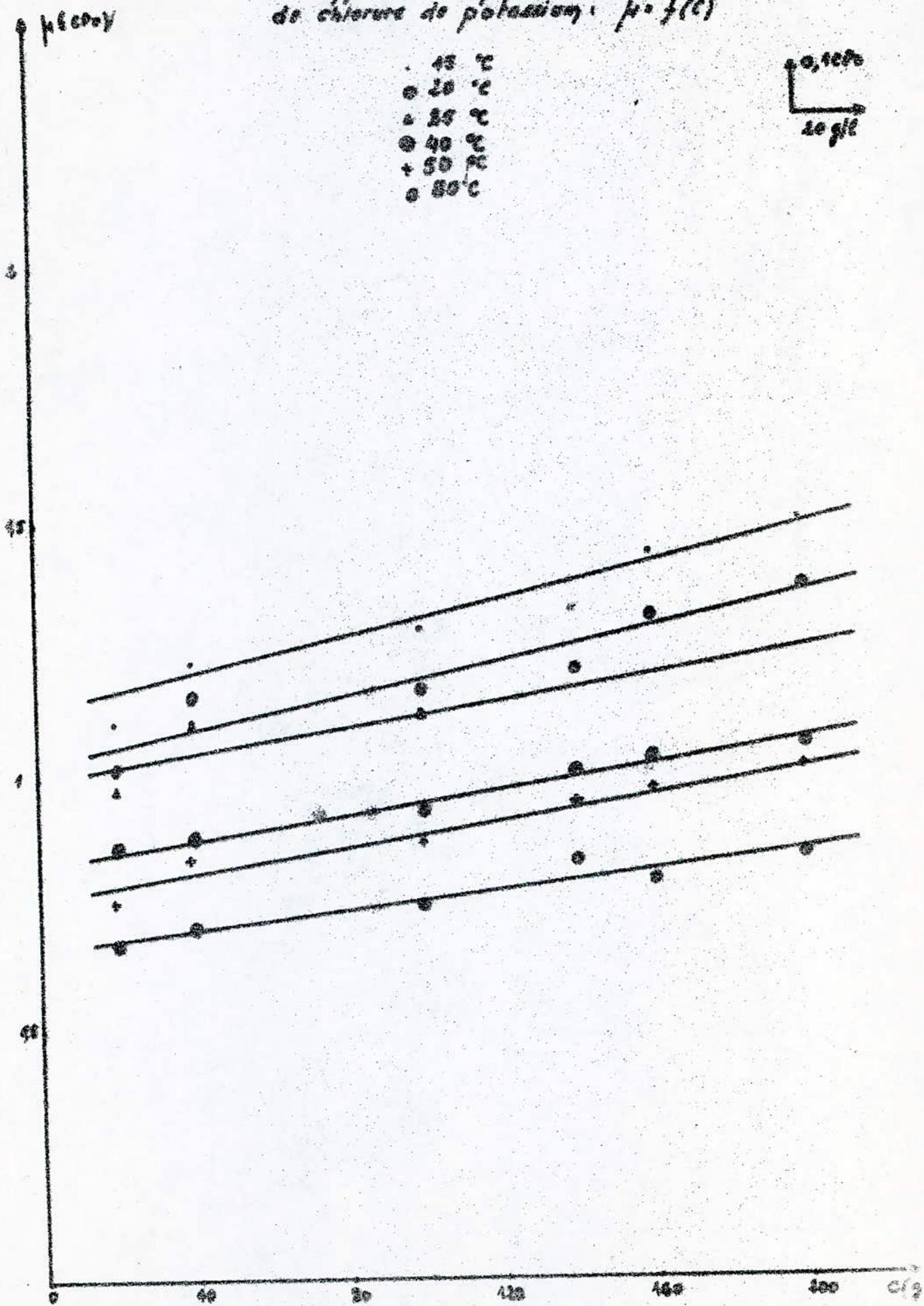


fig: 11-b

Variation de la viscosité en fonction de la Concentration à différentes températures, d'une solution aqueuse de chlorure de potassium: $\mu = f(C)$



Influence de la température et la Concentration
sur la Viscosité.

Solution aqueuse de Chlorure de Calcium.

Tab. 12

T(°C)	C = 20 g/l.			C = 40 g/l.		
	t _{moyen} (s)	d ₄	μ(cPo)	t _{moyen} (s)	d ₄	μ(cPo)
15	21,1	1,0129	1,3720	21,5	1,0288	1,3849
20	18,6	1,0126	1,2036	19	1,0281	1,2328
25	17,2	1,0122	1,1186	17,5	1,0278	1,1356
30	16,6	1,0118	1,0797	16,3	1,0271	1,0578
35	15,5	1,0113	1,0082	15,5	1,0267	1,0060
40	15	1,0109	0,9757	15	1,0264	0,9736
50	14	1,0101	0,9108	13,5	1,0256	0,9163
60	13,3	0,9997	0,8666	12,5	1,0243	0,8115
70	12,5	0,9987	0,8146	12	1,0236	0,7792
80	11,5	0,9975	0,7561	11,5	1,0229	0,7468
T(°C)	C = 80 g/l.			C = 140 g/l.		
15	22,4	1,0555	1,4476	26	1,0944	1,6708
20	21,1	1,0548	1,3638	22,9	1,0937	1,4717
25	19	1,0541	1,2272	21,4	1,0931	1,3754
30	17,6	1,0538	1,1377	19,8	1,0926	1,2727
35	16,3	1,0534	1,0538	18,3	1,0921	1,1763
40	15,5	1,0531	1,0021	17,8	1,0919	1,1442
50	14,5	1,0526	0,9375	16	1,0911	1,0287
60	13,5	1,0519	0,8723	14,6	1,0903	0,9387
70	12,7	1,0511	0,8230	13,7	1,0894	0,8810
80	12,3	1,0506	0,7855	13,1	1,0887	0,8425
T(°C)	C = 200 g/l.					
15	28,9	1,1328	1,8466			
20	25,9	1,1320	1,6551			
25	23,8	1,1315	1,5210			
30	21,9	1,1311	1,3997			
35	19,9	1,1307	1,2719			
40	19,4	1,1303	1,2400			
50	17,5	1,1296	1,1187			
60	16,2	1,1288	1,0357			
70	15,1	1,1281	0,9658			
80	14,4	1,1277	0,9208			

fig. 12.2

variation de la viscosité en fonction de la température
d'une solution aqueuse de chlorure de calcium à différentes
concentrations : $\mu = f(T)$.

- 200 g/l
- ◊ 100 g/l
- ◉ 50 g/l
- △ 10 g/l

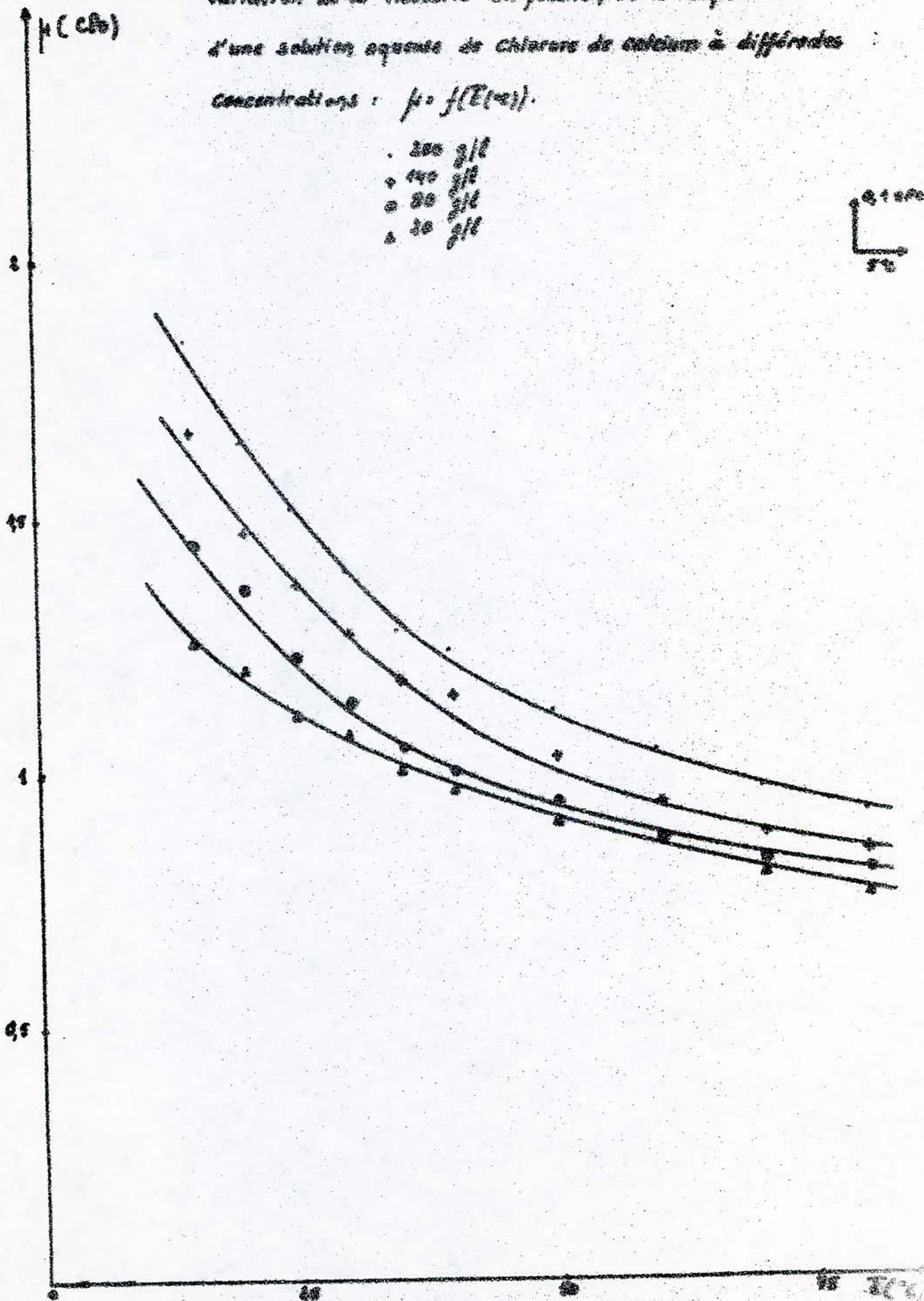
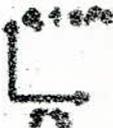
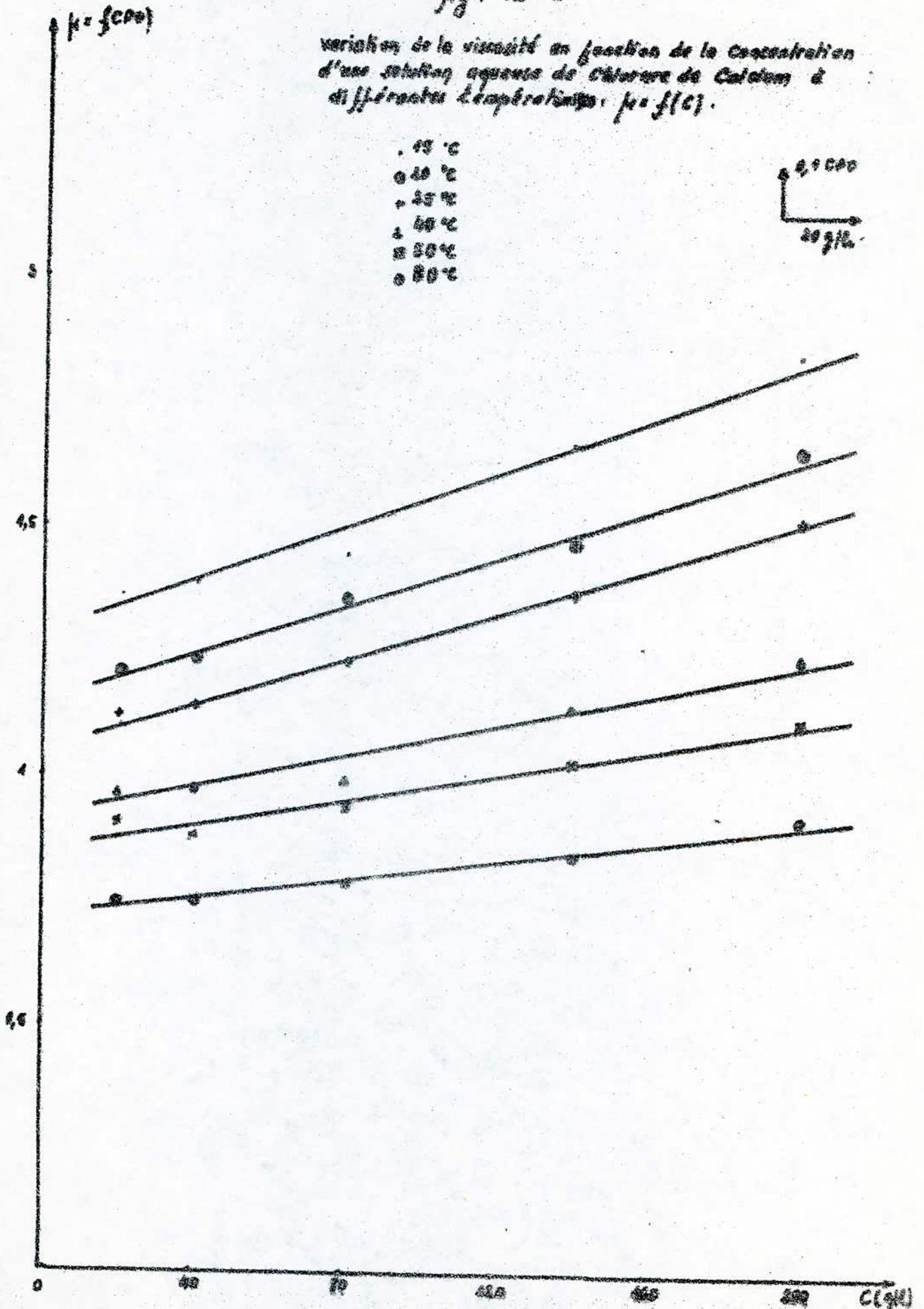


fig. 42. b

variation de la viscosité en fonction de la concentration
d'une solution aqueuse de chlorure de Calcium à
différentes températures: $\mu = f(C)$.

- 15 °C
- 20 °C
- + 25 °C
- △ 30 °C
- ⊠ 35 °C
- 40 °C



Influence de la Température et de la Concentration Sur la Viscosité.

Solution aqueuse de Saccharose.

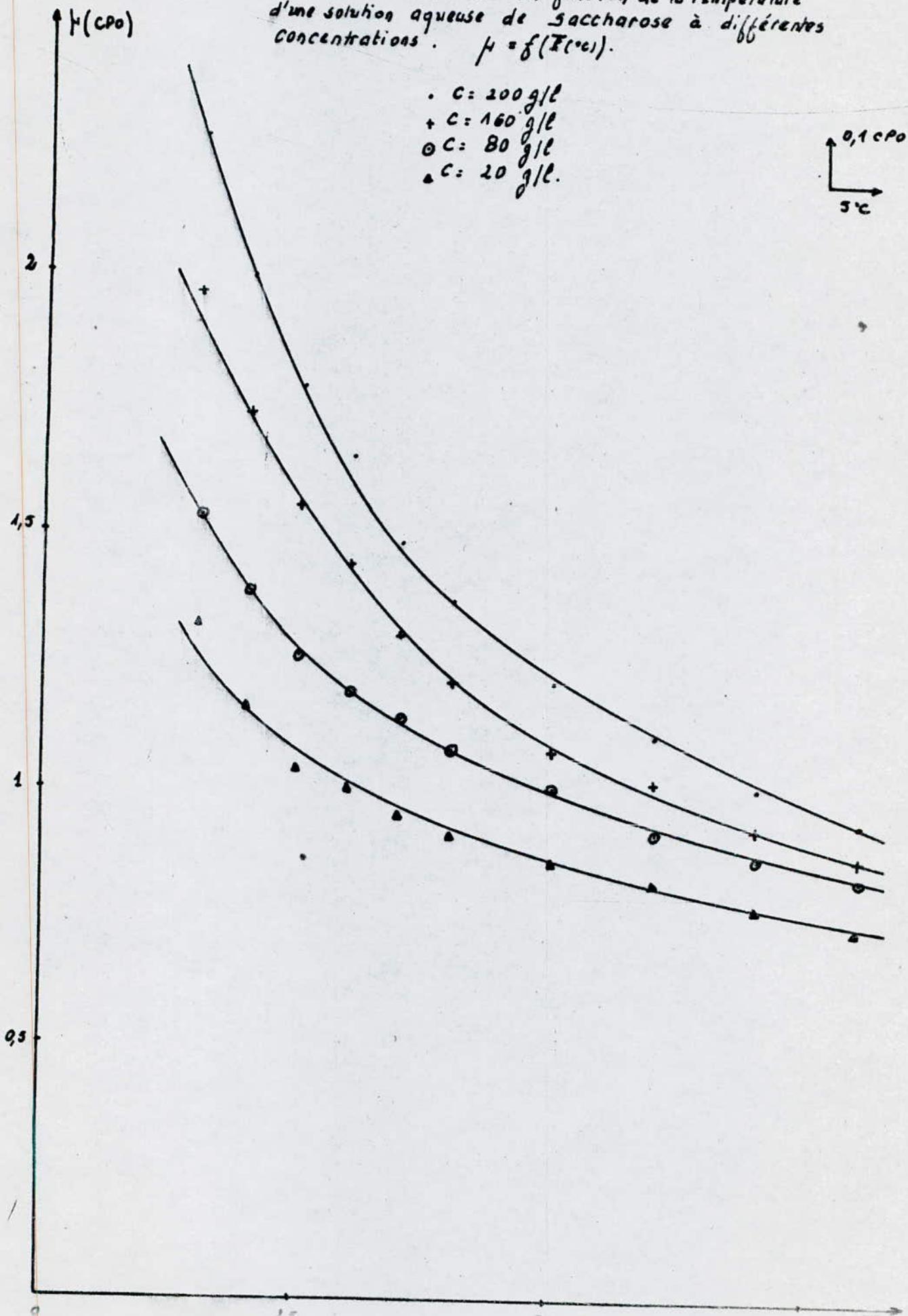
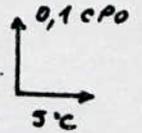
Tab. 13

T(°C)	C = 20 g/l.			C = 40 g/l.		
	$t_{moyen}(s)$	d_4^T	$\mu(cPo)$	$t_{moyen}(s)$	d_4^T	$\mu(cPo)$
15	20,2	1,0075	1,3277	21,3	1,0144	1,3850
20	18	1,0069	1,1716	20,3	1,0139	1,3189
25	16,2	1,0064	1,0545	19	1,0134	1,2355
30	15,5	1,0058	1,0090	17,3	1,0127	1,1254
35	14,7	1,0054	0,9570	16,5	1,0122	1,0731
40	14,1	1,0049	0,9190	16	1,0119	1,0407
50	13,3	1,0041	0,8660	14,6	1,0111	0,9497
60	12,8	1,0037	0,8333	13,9	1,0106	0,8977
70	12	1,0032	0,7915	13,0	1,0094	0,8459
80	11,4	1,0027	0,7425	12,1	1,0074	0,7974
T(°C)	C = 80 g/l.			C = 160 g/l.		
15	23,6	1,0292	1,5311	30,4	1,0505	1,9644
20	21,2	1,0285	1,3756	26,7	1,0549	1,7257
25	19,5	1,0278	1,2654	24	1,0539	1,5514
30	18,4	1,0271	1,1941	22,2	1,0534	1,4552
35	17,5	1,0266	1,1357	20,1	1,0528	1,2996
40	16,6	1,0260	1,0775	18,9	1,0521	1,2221
50	15,4	1,0251	0,9997	16,7	1,0511	1,0900
60	14,2	1,0242	0,9220	15,8	1,0498	1,0219
70	13,4	1,0229	0,8702	14,3	1,0485	0,9251
80	12,8	1,0218	0,8313	13,5	1,0477	0,8735
T(°C)	C = 200 g/l.					
15	35,2	1,0697	2,2702			
20	30,9	1,0688	1,9866			
25	27,6	1,0676	1,7866			
30	25,5	1,0668	1,6453			
35	22,9	1,0656	1,4778			
40	21,2	1,0651	1,3692			
50	19,7	1,0644	1,2070			
60	17,2	1,0634	1,1103			
70	15,7	1,0626	1,0136			
80	14,6	1,0614	0,9428			

fig: 13.2

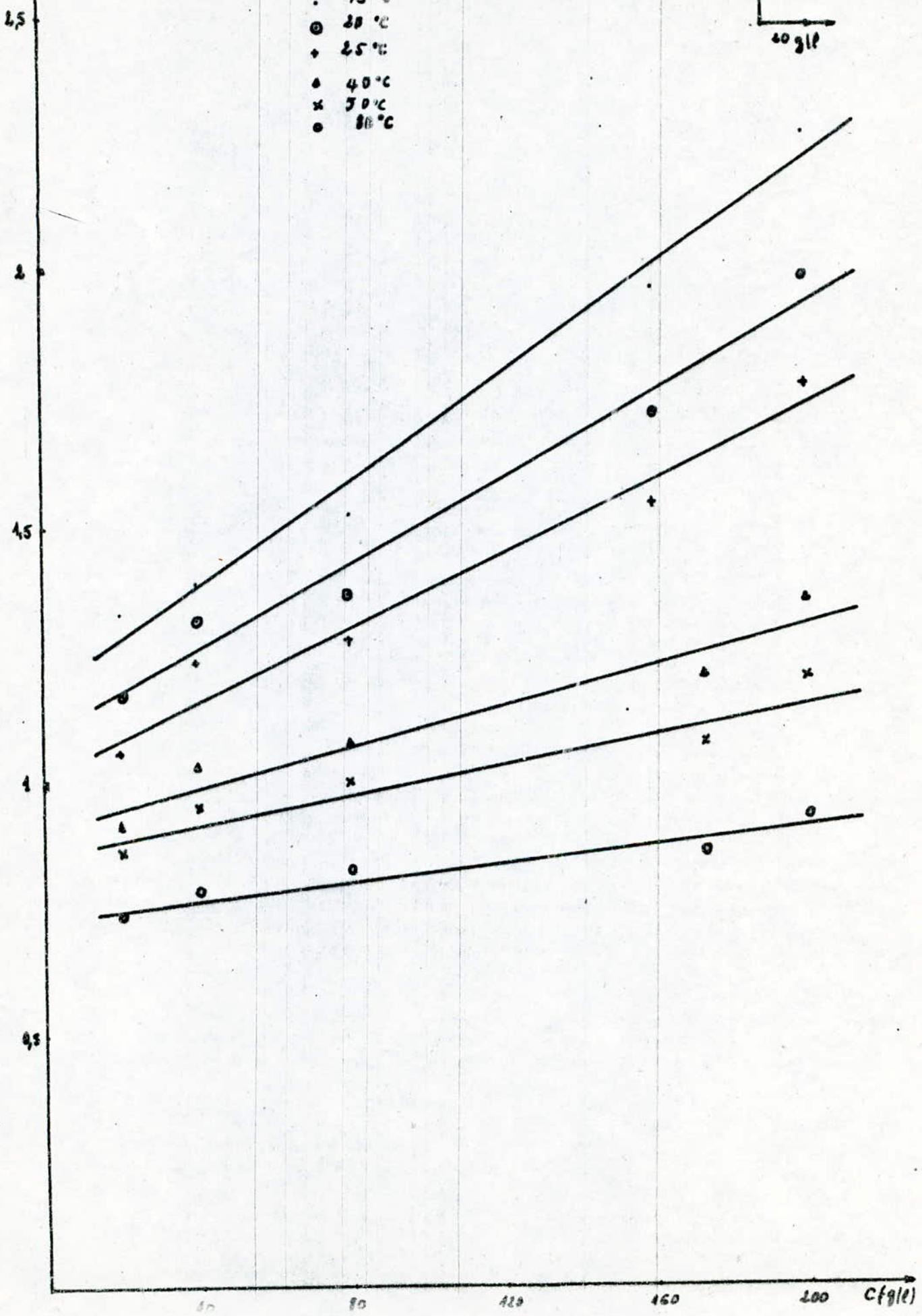
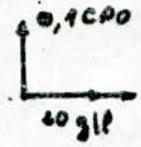
variation de la viscosité en fonction de la température
d'une solution aqueuse de saccharose à différentes
concentrations. $\mu = f(T(^{\circ}C))$.

- c: 200 g/l
- + c: 160 g/l
- ⊙ c: 80 g/l
- ▲ c: 20 g/l.



variation de la viscosité en fonction de la concentration d'une solution aqueuse de saccharose à différentes températures: $\mu = f(c)$.

- 45 °C
- ⊙ 30 °C
- + 25 °C
- ▲ 40 °C
- × 50 °C
- 60 °C



Pentes et ordonnées à l'origine traduisant l'influence de la Concentration sur μ des différentes solutions aqueuses; en fonction de la température.

Tab. 14

B: pente.
A: ordonnée.

T(°C)	Saccharose		Chlorure de Sodium		Chlorure de Potassium		Chlorure de Calcium	
	B · 10 ³	A	B · 10 ³	A	B · 10 ³	A	B · 10 ³	A
15	5,2061	1,1751	1,7165	1,2829	1,9314	1,4036	2,7578	1,2835
20	4,2403	1,0920	1,4966	1,1716	1,6486	1,0280	2,4678	1,4497
25	3,6390	1,0135	1,0897	1,1115	1,2302	1,0044	2,3012	1,0548
30	3,2723	0,9545	1,0316	1,0218	1,1395	0,9374	1,9193	1,0053
35	2,5870	0,9300	0,9434	0,9734	1,2937	0,8708	1,5610	0,9534
40	2,1964	0,9057	1,1019	0,9110	1,4605	0,8340	1,5783	0,9156
50	1,6352	0,8570	0,9250	0,8116	1,2300	0,7695	1,2947	0,8504
60	1,3901	0,8181	0,6674	0,7910	1,0228	0,7290	1,0832	0,8011
70	1,4062	0,7586	0,6315	0,7439	0,9878	0,6918	0,9350	0,7639
80	0,9758	0,7379	0,6291	0,7022	0,9442	0,6581	0,9498	0,7212

fig. 44. B

variation de la pente θ en fonction de la

température : $\theta = f(T(^{\circ}C))$.

Saccharose

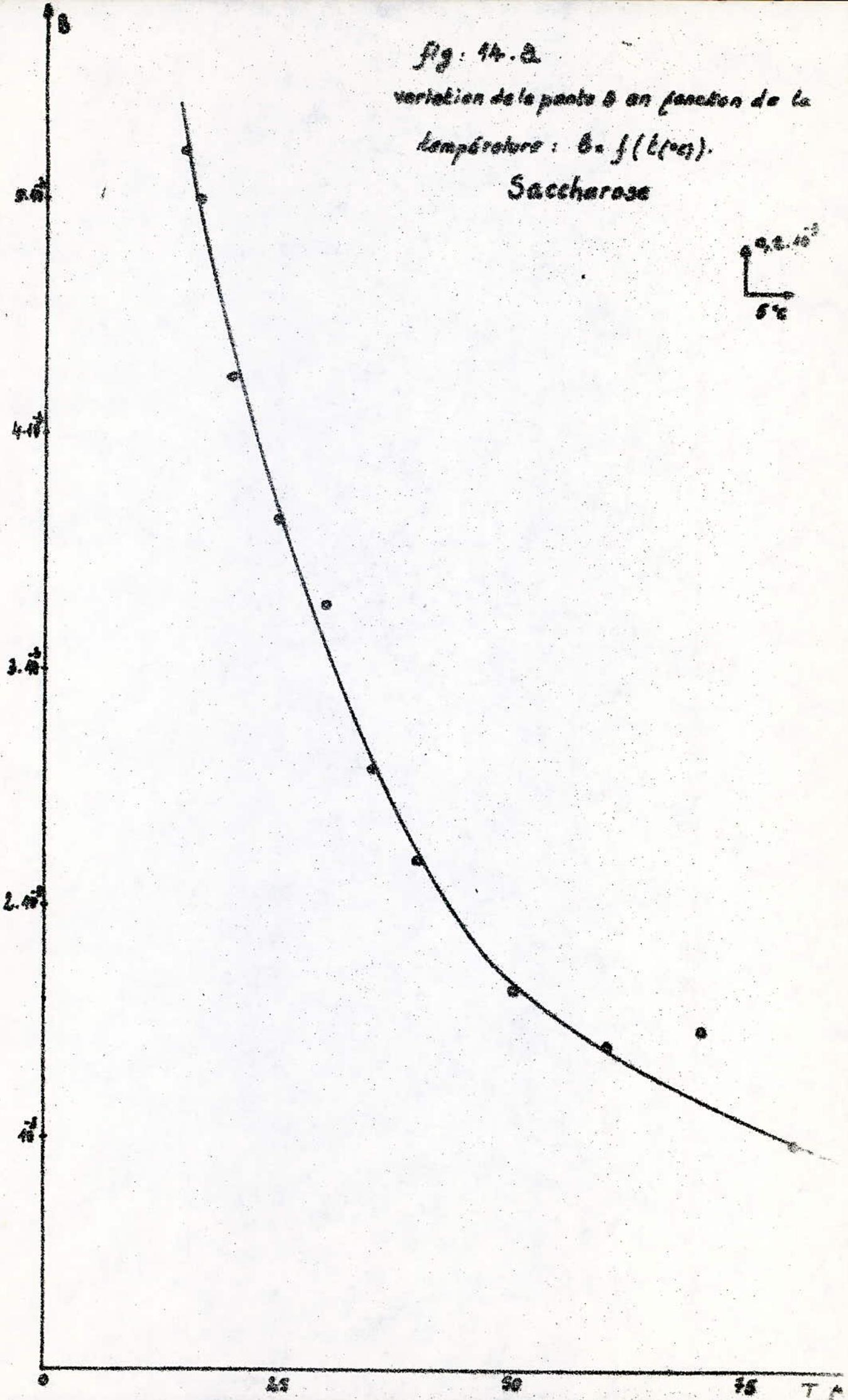
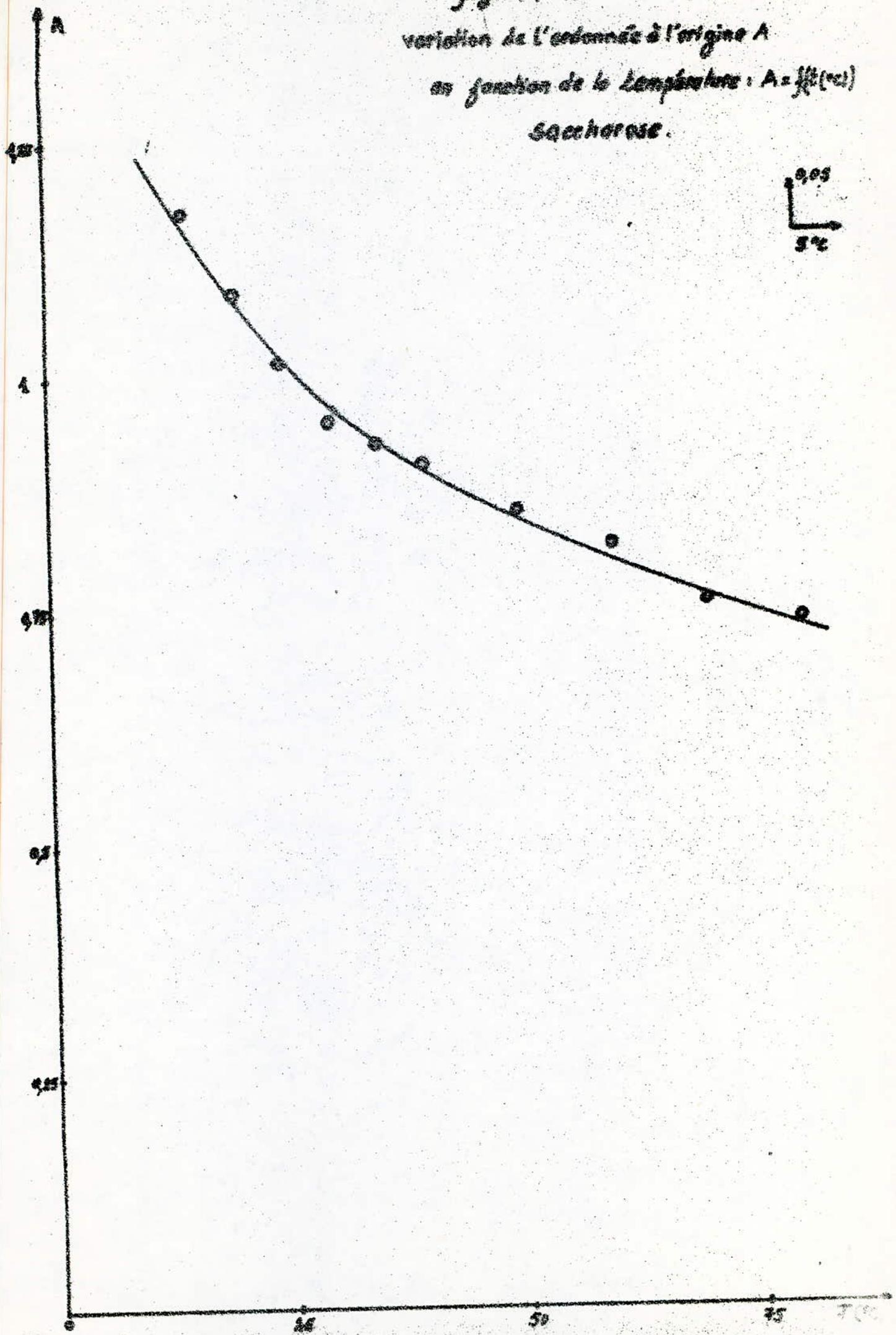


Fig. 14-b
variation de l'ordonnée à l'origine A
en fonction de la Température : $A = f(T)$
Saccharose.



Tab. 15

$\frac{1}{T(K)}$	Saccharose		chlorure de Sodium		Chlorure de Potassium		chlorure de Calcium	
	Ln B	Ln A	Ln B	Ln A	Ln B	Ln A	Ln B	Ln A
3,472	-5,2579	0,1614	-6,3675	0,2491	-6,2495	0,0986	-5,9010	0,2496
3,443	-5,4631	0,0880	-6,5046	0,1584	-6,4078	0,0276	-6,0044	0,1395
3,356	-5,6160	0,0134	-6,8218	0,1055	-6,7006	0,0014	-6,0743	0,0533
3,300	-5,7233	-0,0466	-6,8766	0,0216	-6,7772	-0,0646	-6,2598	0,0053
3,247	-5,9573	-0,0727	-6,9660	-0,0269	-6,6502	-0,1383	-6,4624	-0,0477
3,195	-6,1210	-0,0990	-6,8107	-0,0932	-6,7589	-0,1815	-6,4514	-0,0882
3,096	-6,4160	-0,1543	-6,9879	-0,2087	-6,7007	-0,2620	-6,6518	-0,1620
3,003	-6,5774	-0,2003	-7,3121	-0,2345	-6,8852	-0,3161	-6,8278	-0,2213
2,915	-6,5251	-0,2763	-7,3674	-0,2958	-6,9200	-0,3685	-6,9750	-0,2705
2,833	-6,9322	-0,3039	-7,7712	-0,2456	-6,9652	-0,4184	-6,9593	-0,3268

fig: 15-a

variation du logarithme de la pente B en fct de $\frac{1}{T(k)}$
saccharose

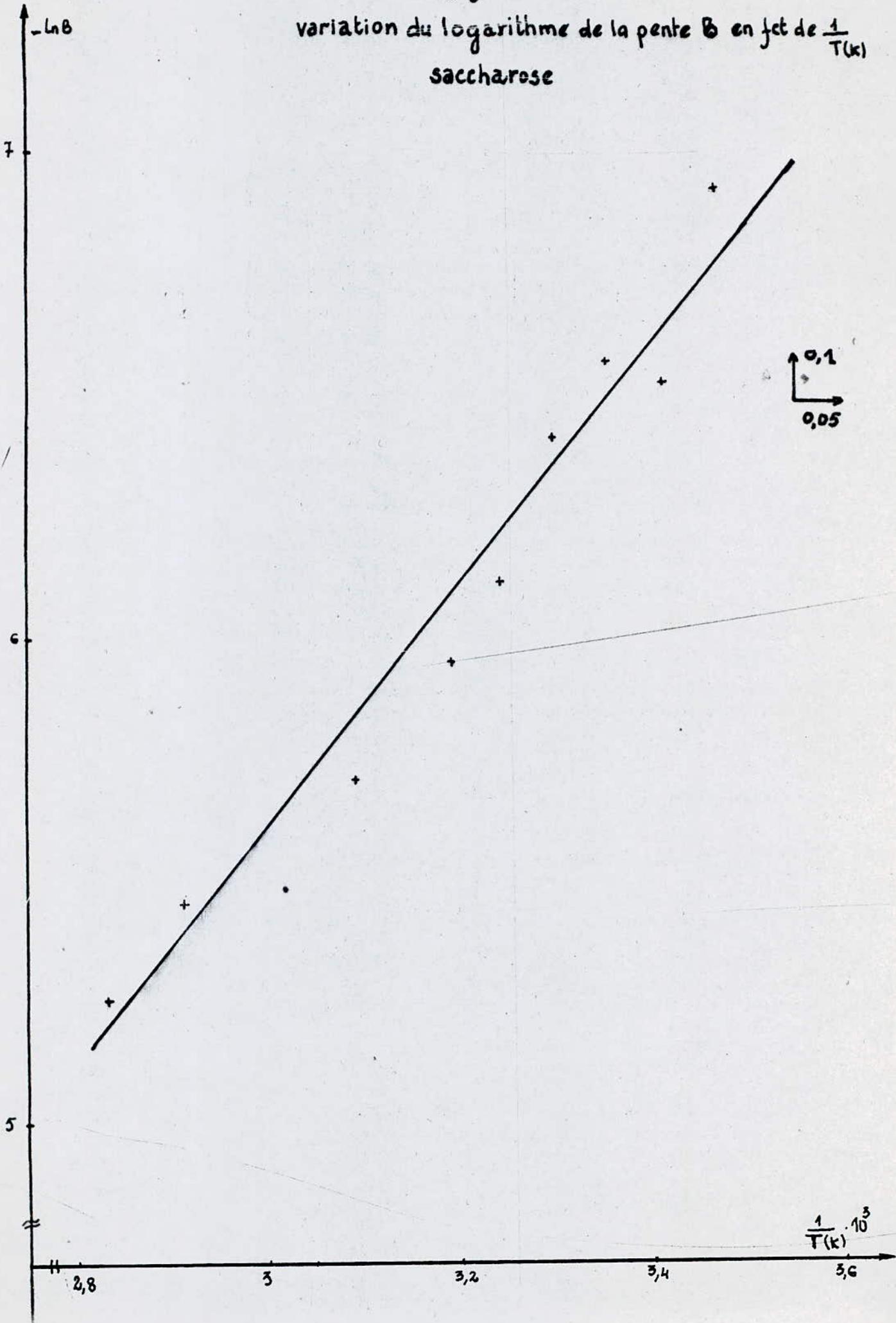
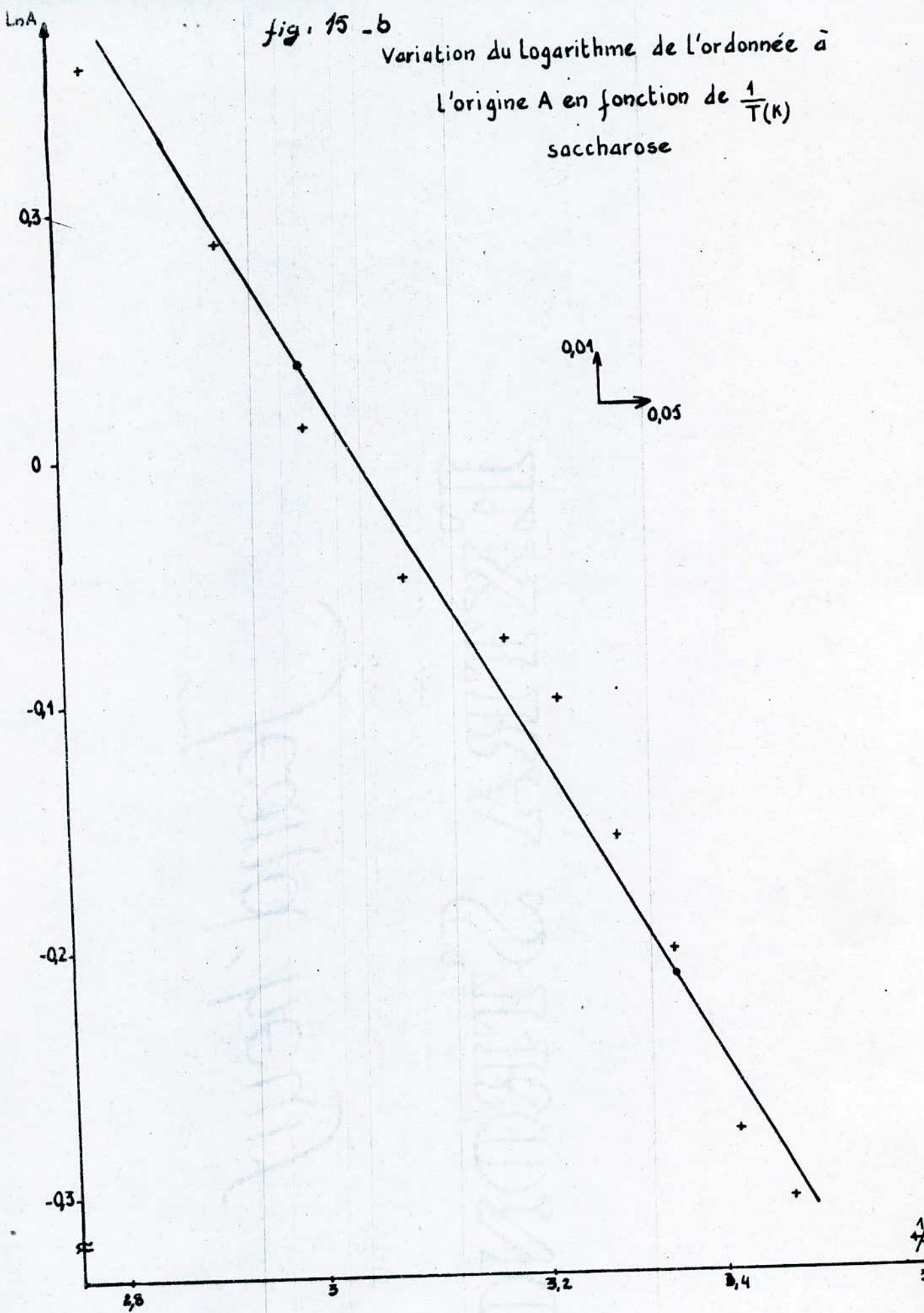


fig. 15 - b

Variation du Logarithme de l'ordonnée à l'origine A en fonction de $\frac{1}{T(K)}$ saccharose



INTERPRETATION :

L' influence de la concentration est traduite par des droites ne passant pas par l'origine du type $\mu = A + B.C$ pour chaque système.

A et B sont l'ordonnée à l'origine et la pente .

Ces coefficients sont en fonction de la température , en utilisant la méthode des moindres carrés on calcule à chaque température et pour chaque système étudié . les résultats de calcul sont consignés dans le tableau (14)

La variation de ces coefficients en fonction de la température a une allure hyperbolique de sorte que le logarithme de ces coefficients en fonction de l'inverse de la température absolue (K) est une droite du type :

$$A = a_1 + b_1 / T$$

$$B = a_2 + b_2 / T .$$

La détermination de a_1 et b_1 par la méthode des moindres carrés nous permet d'écrire une relation générale traduisant la variation de la viscosité en fonction de la concentration et de la température pour chaque système étudié.

Pour chaque système on écrit :

μ SACCHAROSE :

$$\mu = 0,1025 \exp(687,3 / T) + 8,2408.10 \exp (2497,68 / T) . C$$

μ CHLORURE DE SODIUM :

$$\mu = 0,0562 \exp (885,04 / T) + 8,0495.10 \exp (1505,1 / T) . C$$

μ CHLORURE DE POTASSIUM :

$$\mu = 0,0624 \exp (820,81 / T) + 7,0479.10 \exp (298,1 / T) . C$$

μ CHLORURE DE CALCIUM :

$$\mu = 0,0649 \exp (838,2 / T) + 5,1526.10 \exp (1796,83 / T) . C$$

μ est exprimée en cPO
 " en g/L
 " en Kelvin .

CONCLUSION

Dans le cadre ce travail nous avons essayer d'étudier l'influence de certains paramètres sur la viscosité des liquides qui est une caractéristique importante à connaître afin de mieux approcher les phénomènes d'écoulement et les processus qu'il engendre .

Nous avons alors commencé par étudier l'influence de la température pour les liquides purs afin de pouvoir comparér les valeurs expérimentales et corrélatives pour ainsi s'assurer du bon fonctionnement de l'appareillage. Les résultats trouvés revellent une bonne concordance de sorte que les écarts restent insignificatifs dans le domaine d'utilisation de l'appareil .

nous
En fin^v avons établi des relations donnant la viscosité en fonction de la température et de la concentration des solutions aqueuses de :

- Chlorure de Sodium
- Chlorure de Potassium
- Chlorure de Calcium
- Saccharose .

000 B I B L I O G R A P H I E 000

- (1) - PIERRE WUTHIER
Le pétrole, raffinage et génie chimique - Tome I .
- (2) - COLLECTIONS COLLOQUES et SEMINERES
Les produits pétroliers et l'entretien
Publication de l'institut Français de pétrole Technip. 1969 .
- (3) - R . COMOLET
Mécanique expérimentale des fluides
Tome: I. Statique et dynamique des fluides, 1961.
Tome: II. Dynamique des fluides réels, 1963.
- (4) - PRANDTL - LUDWIG
Guide à travers la mécanique des fluides
Dunod: Paris 1952.
- (5) - BIRD - STEWART - LIGHTFOOT
Transport phenomena
Wiley international Edition 1960.
" JOHN WILEY and SONS. "Inc" .
- (6) - C.E.R.H.Y.D
Méthodes d'essais des lubrifiants Fev. 1987.
- (7) - Méthodes d'essai des produits pétroliers
Bureau de normalisation du pétrole.
AFNOR 1970.
- (8) - W.J.MOORE traduit par H.ABERDAM.
Chimie physique
Dunod . Paris 1961.
- (9) - M. THELLIER & A. HOUEURT
Viscosité des mélanges de paraffines
Nouvelles méthodes de calcul
Edition Technip. 1973.
- (10) - Viscosité et masse volumique des paraffines légères , Azote et dioxyde
de carbone
Technip. Paris 1970.
- (11) - Reid - PRAUSNITZ - SHERWOOD
Properties of gaz and liquids 3 ème Ed. MC - Graw HILL - 1975
- (12) - P.W. ATKINS
Chimie physique Tome II. Tech.& Docm. LAVOISIER
VUIBERT JUIN 1983.

