

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie



Mémoire de fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme Master 2 en Génie
Mécanique.

Option: Construction mécanique.

THEME

*Les comportements rhéologiques des
huiles de coupe*

Proposé par :

Mr: BOURAS

Réalisé par :

Melle: SI TAYEB Fatima

Melle: REBAH Souad

Promotion : 2012/2013

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force, la volonté et le courage pour l'élaboration de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos chers parents pour leurs soutiens tout au long de nos études.

Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance à l'égard de tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, particulièrement à notre promoteur Mr BOURAS pour sa disponibilité, ses conseils et suggestions.

Nos remerciements vont également à Mr ANAIS Hamid pour sa collaboration fructueuse durant notre travail expérimental au niveau du laboratoire du département de Génie Mécanique.

Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.

*Notre sincère reconnaissance à nos enseignants du département
Génie mécanique.*

Merci

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu tout au long de ma vie, qui m'ont orienté dans le bon chemin et qui ont tout fait pour que je réussisse, que Dieu vous bénisse et vous garde;

*Mes très chers frères : Tayeb, Belkacem, Brahim, Arizeki ;
A mes très chères sœurs : Zohra, Khadidja ;
Plus spécialement Fatma et son mari Atallah ;*

Et leurs enfants : Meriem, Aymen ;

A ma très chère tante: Dahvoucha ;

A tous mes amis (es), et spécialement Zahia ;

A tous les étudiants de Master II en construction mécanique de la promotion 2012/2013 ;

Fatima

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu
tout au long de ma vie, qui m'ont orienté dans le bon
chemin et qui ont tout fait pour que je réussisse, que Dieu
vous bénisse et vous garde;*

Mes très chers frères : Taieb, Ouramdane ;

A toute ma famille ;

A tous mes amis (es) et tous ceux que j'aime ;

*A tous les étudiants de Master II en construction mécanique
de la promotion 2012/2013 ;*

Souad

Sommaire

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Sommaire.....	iv
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	xvi
Nomenclature.....	xvii
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Notions de base sur la rhéologie

I.1.Introduction.....	3
I.2.Définition de la rhéologie.....	3
I.3.Domaines d'utilisation.....	3
I.4.Régimes d'écoulements.....	5
I.5.Mouvement laminaire de cisaillement..... ;;	6
a) Contrainte de cisaillement.....	6
b) Déformation de cisaillement γ	8
c) Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$	9
I.6.viscosités.....	10
a) Viscosité dynamique.....	11
b) Viscosité cinématique.....	11
I.7.Equation rhéologique d'état.....	12
I.8.Rheogrammes.....	12
I.9.Comportements rhéologiques.....	13
I.9.1-Fluides Newtoniens.....	13
I.9.2-Fluides non Newtoniens.....	13
a) Fluides fluidifiants.....	14
b) Les fluides épaisissants.....	15

Sommaire

c) Fluides Binghamiens.....	16
d) Fluides d'Ostwald.....	17
e) la thixotropie et l'antithixotropie.....	18
I.10.Appareils utilisés en rhéologie.....	19
I.10.1-Rhéomètres à régime permanent.....	20
a) Rhéomètres de type couette.....	20
b) Rhéomètres de type Poiseuille.....	24
c) Rhéomètres a chute de bille.....	24
I.10.2-Rhéomètres à régime transitoire.....	25
a) Rhéomètres a fluage.....	25
b) Rhéomètres à relaxation.....	26
I.10.3-Rhéomètres dynamiques (ou a oscillation).....	26
a) Rhéomètres à oscillation forcées.....	27
b) Rhéomètres utilisés a la résonance.....	28
c) Les appareils à oscillation libres.....	28

Chapitre II : la tribologie

II.1. Introduction.....	29
II.2. Définition de la tribologie.....	29
II.3. Importance de la tribologie.....	29
II.4. Système tribologique	30
II.5. type de contact.....	31
II.6 .Concept du troisième corps.....	32
II.7. Le triplet tribologique	33
II.8. Les phénomènes de la tribologie.....	33
II.8.1.Le frottement.....	33
II.8.2.l'usure.....	34

Sommaire

II.8.2.1. Phénomènes d'usure.....	34
II.8.2.2. Les origines d'usure.....	35
II.8.2.3. Différents types d'usure.....	35
II.8.3. Les lubrifiants.....	35
II.8.3.1. Définition.....	35
II.8.3.2 Fonctions d'un lubrifiant.....	36
II.8.3.3 Différents types de lubrifiants.....	36
a) Lubrifiants solides.....	36
b) Lubrifiants liquides.....	37
c) Lubrifiants plastiques.....	37
d) Lubrifiants gazeux.....	37
II.8.3.4. Les additifs.....	38
II.8.3.5. Principales caractéristiques des lubrifiants.....	39
II.8.3.6. Les huiles de coupe.....	42
a) Classification des fluides de coupe aqueux.....	43
b) Formulation générale.....	44
II.9. Conclusion.....	45

Chapitre III : partie expérimentale

III.1. Introduction.....	46
III.2. Matériau et matériel utilisés.....	46
III.2.1. Matériau.....	46
III.2.2 Matériel.....	46
III.3. Procédure expérimentale.....	48
III.4. Résultats et interprétations.....	49
III.4.1 Influence du pourcentage de l'eau.....	49
III.4.2. Influence de la température.....	65
III.4.3. Evolution des paramètres rhéologiques intrinsèques en fonction du % d'eau.....	70

Sommaire

a. La contrainte seuil τ_0 (Pa).....	70
b. La viscosité μ (Pa.s).....	71
c. Indice de pouvoir d'écoulement n (sans unité).....	72
III.4.4. Evolution des paramètres rhéologiques intrinsèques en fonction de la température...	72
a. La contrainte seuil τ_0 (Pa).....	72
b. La viscosité μ (Pa.s).....	73
c. Indice de pouvoir d'écoulement n (sans unité).....	73
Conclusion générale.....	75
Références bibliographiques.....	76

Chapitre I : Notions de bases de rhéologie

Figure I.1 : Sang humain.....	3
Figure I.2 : Gel pour cheveux.....	4
Figure I.3 : Lave volcanique.....	4
Figure I.4 : Béton.....	4
Figure I.5 : Régime laminaire(a), régime turbulent(b).....	5
Figure I.6 : Représentation de la contrainte de cisaillement.....	6
Figure I.7 : Représentation de la contrainte de cisaillement dans le cas de la symétrie plane.....	8
Figure I.8 : Représentation de l'angle $\alpha(x, t)$ que fait la tangente en x à la courbe joignant les extrémités des vecteurs vitesses de déplacements $u(x, t)$ et l'axe x	9
Figure I.9 : Concept de la vitesse de cisaillement.....	10
Figure I.10 : Schéma du glissement des couches.....	10
Figure I.11 : Rhéogramme d'un liquide newtonien.....	13
Figure I.12 : Viscosité d'un liquide newtonien.....	13
Figure I.13 : Rhéogramme d'un corps fluidifiants.....	15
Figure I.14 : Variation de la viscosité d'un corps fluidifiants.....	15
Figure I.15 : Rhéogramme d'un corps rhéoépaississant.....	16
Figure I.16 : Variation de la viscosité d'un corps rhéofluidifiant.....	16
Figure I.17 : Rhéogramme d'un fluide de bingham.....	17
Figure I.18 : Rhéogramme d'un fluide d'Ostwald.....	19
Figure I.19 : Boucle d'hystérésis de référence d'un gel rhéofluidifiant.....	19
Figure I.20 : Schéma d'un rhéomètre plan à translation.....	21
Figure I.21 : Représentation d'un rhéomètre rotatif cylindrique.....	22
Figure I.22 : Représentation d'un rhéomètre rotatif à cône plateau.....	23

Liste des figures

Figure I.23 : Représentation des forces subies par la bille.....	25
Figure I.24 : Schéma d'un rhéomètre cylindrique en translation.....	27

Chapitre II : La tribologie

Figure II.1 : Représentation schématique d'un tribosystème.....	31
Figure II.2 : Le contact ponctuel.....	31
Figure II.3 : Le contact linéaire.....	32
Figure II.4 : Le contact surfacique.....	32
Figure II.5 : Deux solides séparés par un film épais de lubrifiant liquide.....	37
Figure II.6 : Ecoulement de quelques substances de différentes viscosités.....	40

Chapitre III : Partie expérimentale

Figure III.1 : Rhéomètre RHEOStress01.....	47
Figure III.2 : Logiciel HAAKRheowin.....	47
Figure III.3 : Protocole d'essai.....	48
Figure III.4 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0% d'eau.....	49
Figure III.5 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 1% d'eau.....	49
Figure III.6 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3% d'eau.....	50
Figure III.7 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5% d'eau.....	50
Figure III.8 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10% d'eau.....	50

Liste des figures

Figure III.9 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20% d'eau.....	50
Figure III.10 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40% d'eau.....	51
Figure III.11 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 50% d'eau.....	51
Figure III.12 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 60% d'eau.....	51
Figure III.13 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80% d'eau.....	51
Figure III.14 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 85% d'eau.....	52
Figure III.15 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 90% d'eau.....	52
Figure III.16 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 65% d'eau.....	52
Figure III.17 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0% d'eau.....	53
Figure III.18 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 1% d'eau.....	53
Figure III.19 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3% d'eau.....	53
Figure III.20 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5% d'eau.....	53
Figure III.21 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10% d'eau.....	54

Liste des figures

Figure III.22 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20% d'eau.....	54
Figure III.23 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40% d'eau.....	54
Figure III.24 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 50% d'eau.....	54
Figure III.25 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 60% d'eau.....	55
Figure III.26 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80% d'eau.....	55
Figure III.27 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 85% d'eau.....	55
Figure III.28 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 90% d'eau.....	55
Figure III.29 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 95% d'eau.....	56
Figure III.30 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0% d'eau.....	56
Figure III.31 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 1% d'eau.....	56
Figure III.32 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3% d'eau.....	57
Figure III.33 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5% d'eau.....	57

Liste des figures

Figure III.34 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10% d'eau.....	57
Figure III.35 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20% d'eau.....	57
Figure III.36 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40% d'eau.....	58
Figure III.37 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 50% d'eau.....	58
Figure III.38 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 60% d'eau.....	58
Figure III.39 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80% d'eau.....	58
Figure III.40 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 85% d'eau.....	59
Figure III.41 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 90% d'eau.....	59
Figure III.42 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 95% d'eau.....	59
Figure III.43 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0% d'eau.....	60
Figure III.44 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 1% d'eau.....	60
Figure III.45 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3% d'eau.....	60

Liste des figures

Figure III.46 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5% d'eau.....	60
Figure III.47 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10% d'eau.....	61
Figure III.48 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20% d'eau.....	61
Figure III.49 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40% d'eau.....	61
Figure III.50 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 50% d'eau.....	61
Figure III.51 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 60% d'eau.....	62
Figure III.52 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80% d'eau.....	62
Figure III.53 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 85% d'eau.....	62
Figure III.54 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 90% d'eau.....	62
Figure III.55 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 95% d'eau.....	63
Figure III.56 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour une température de 25°C	63
Figure III.57 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour une température de 40°C	64

Liste des figures

Figure III.58 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour une température de 60°C	64
Figure III.59 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour une température de 80°C	65
Figure III.60 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0% d'eau.....	65
Figure III.61 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 1% d'eau.....	66
Figure III.62 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3% d'eau.....	66
Figure III.63 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5% d'eau.....	66
Figure III.64 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10% d'eau.....	67
Figure III.65 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20% d'eau.....	67
Figure III.66 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40% d'eau.....	67
Figure III.67 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 50% d'eau.....	68
Figure III.68 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 60% d'eau.....	68
Figure III.69 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80% d'eau (25°C ,40°C).....	68

Liste des figures

Figure III.70 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80% d'eau (60°C ,80°C).....	69
Figure III.71 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 85% d'eau.....	69
Figure III.72 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 90% d'eau.....	69
Figure III.73 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 95% d'eau.....	70
Figure III.74 : Variation de la contrainte seuil en fonction du % d'eau.....	70
Figure III.75 : Huile avec 20% d'eau.....	71
Figure III.76 : Huile avec 40% d'eau.....	71
Figure III.77 : Variation de la viscosité en fonction du % d'eau.....	71
Figure III.78 : L'indice de pouvoir d'écoulement en fonction du % d'eau.....	72
Figure III.79 : Variation de la contrainte seuil en fonction de la température.....	72
Figure III.80 : Variation de la viscosité en fonction de la température.....	73
Figure III.81 : L'indice de pouvoir d'écoulement en fonction de la température.....	73
Figure III.82 : Huile avec 80% d'eau.....	74
Figure III.83 : Huile avec 0% d'eau.....	74

Chapitre I : Notions de base sur la rhéologie

Tableau I.1 : Principales caractéristiques des régimes d'écoulements.....5

Chapitre II : La tribologie

Tableau II.1 : Les principaux additifs et leur propriétés.....39

Chapitre III : Partie expérimentale

Tableau III.1 : Les différents échantillons utilisées.....46

Nomenclatures

\vec{V}	La vitesse moyenne de l'écoulement [m/s].
l	Longueur caractéristique du rhéomètre [m].
ν	Viscosité cinématique du fluide [m ² /s].
Re	Nombre de Reynolds (sans dimension).
Re_c	Nombre de Reynolds critique (sans dimension).
V_{limite}	Vitesse moyenne limite d'écoulement [m/s].
τ	Contrainte de cisaillement [N/m ²], [Pa].
γ	Déformation de cisaillement (sans dimension).
$\dot{\gamma}$	Vitesse de cisaillement [s ⁻¹].
μ	Viscosité dynamique [P], [Pa.s].
ν	Viscosité cinématique [cm ² /s], [m ² /s].
ρ	Densité du fluide [Kg/m ³], [g/cm ³].
T	Température [°C], [k].
P	Pression [Pa].
t	Le temps [s].
μ_a	Viscosité apparente [Pa.s].
τ_0	Tension de cisaillement [Pa], [N/m ² , dynes/cm ²].
μ_p	Viscosité plastique [P], [Pa.s].
K	Indice de consistance du matériau [braye.s ⁿ].
n	Indice de pouvoir d'écoulement (sans dimension).
F_N	Force normale [N].
F_T	Force tangentiel [N].
F_t	Force de frottement [N].
μ_f	Coefficient de frottement (sans dimension).
μ_s	Coefficient de frottement statique (sans dimension).
μ_D	Coefficient de frottement dynamique (sans dimension).
μ_r	Coefficient de roulement (sans dimension).

Introduction générale

Les fluides de coupe sont largement utilisés dans l'industrie de la mécanique principalement pour leurs propriétés lubrifiantes et/ou pour leur qualité de refroidissement des pièces en métallurgie lors de la coupe. C'est à dire l'usinage des métaux (tournage, fraisage, sciage, ...) à l'aide d'un outil coupant, abrasif, ou par électroérosion ou déformation.

Ils sont utilisés pour faciliter l'opération d'usinage et contribue à améliorer la durée de vie de l'outil utilisé. Ils permettent d'éloigner les copeaux de la zone de coupe, ce qui contribue à l'obtention d'un état de surface de qualité, et de refroidir le copeau et la pièce usinée afin de contribuer à la précision dimensionnelle de la pièce finie.

Depuis les années 2000 les usages des fluides de coupe sont en constante évolution. Il y a environ 15-30 ans, seules les huiles entières étaient utilisées. Aujourd'hui, l'utilisation des huiles varie selon le type d'application en effet le choix d'une huile ne se fait pas au hasard, les gammes de produit proposées par les fournisseurs sont extrêmement large et demandent quelques éléments techniques afin d'être mieux appréhendées.

Les fluides de coupe se repartissent en deux grandes catégories : les huiles entières et les fluides aqueux.

Les huiles entières ont surtout une fonction de lubrification, ce sont généralement des huiles de pétrole plus au moins additivées tandis que les fluides aqueux, eux ont une fonction de refroidissement, en général plus utilisés (600000 t/an en France), ce sont des émulsions d'huile dans l'eau, différents additifs (anti usure, anti grippage, antibactérien, ...) sont ajoutés dans le but d'obtenir des produits stables dans le temps.

Il existe deux grands secteurs principaux utilisateurs de ces fluides : le travail des métaux et l'automobile.

Ce présent travail a été effectué dans le but de comprendre, l'influence de l'eau et de la température sur le comportement rhéologique des fluides de coupe utilisés lors des opérations d'usinages (tournage, fraisage,...).

La démarche suivie a consisté à faire dans une première partie une synthèse bibliographique, des notions de base sur la rhéologie et la tribologie.

Introduction générale

La deuxième partie est la partie expérimentale. On décrit le déroulement des expériences, on présente les résultats obtenus et leurs interprétations.

Pour finir, on propose une conclusion générale dans laquelle on fait un bilan de résultats obtenus et des différentes conclusions tirées sur les différents travaux réalisés.

I.1.Introduction

Rhéologie, mot savant inventé par Engène Cook Bingham en 1929 à partir du grec RHEO : couler et LOGOS: étude. Littéralement, la science de l'écoulement. cette discipline traite de l'écoulement, et déformations des matériaux sous l'action de contraintes, en effet devant l'impuissance de la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides (théories élaborées au 19e siècle) à décrire et à expliquer les propriétés de matériaux aux comportements mal définis, la rhéologie a émergé et s'est développée très rapidement par l'apparition d'un nombre sans cesse croissant de substances au comportement complexe : les pâtes, boues, polymères, émulsions, suspensions...[1]

I.2.Définition de la rhéologie

La rhéologie est la science de la matière en écoulement, elle consiste en l'étude de la déformation des matériaux (cas des solides) ou leur écoulement (cas des liquides) sous l'effet d'une contrainte. [2]

La rhéologie renferme principalement trois axes d'études : [3]

- Détermination expérimentale des relations de comportement entre contraintes et déformations : la rhéologie expérimentale.
- Explication du comportement rhéologique des matériaux à partir de leur structure: rhéologie structurale.
- Modélisation mathématique du comportement des matériaux : rhéologie théorique.

I.3.Domains d'utilisation

Le champ d'application de la rhéologie ne cesse de s'étendre au fil des années, du fait de l'élaboration de substances aux comportements de plus en plus complexes.

La rhéologie est utilisée dans plusieurs domaines citons à titre d'exemples :

- La médecine : le sang, la bave, les bactéries,...

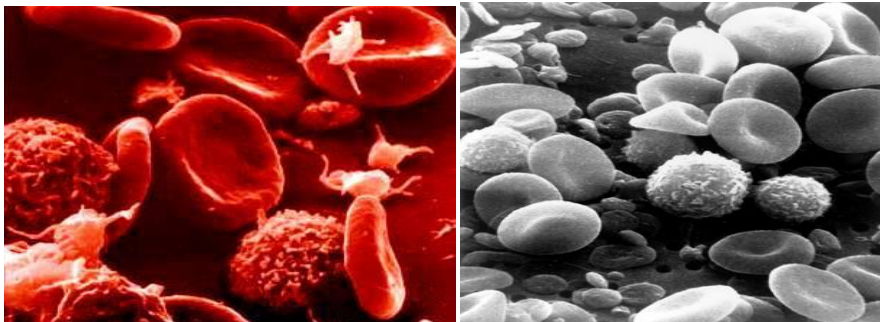


Figure I.1 : sang humain.

- Les cosmétiques : les gels, les crèmes,...



Figure I.2 : Gels pour cheveux.

- La géophysique : les sables mouvants, la lave, la boue,...

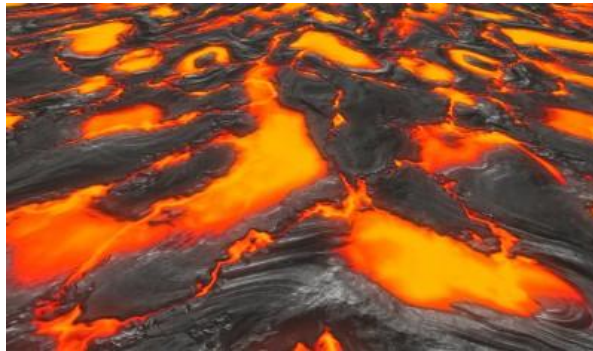


Figure I.3 : Lave volcanique

- La construction : les sols, l'argile, les bétons,....



Figure I.4 : Béton.

I.4.Régimes d'écoulements

L'écoulement d'un fluide dans un tuyau peut être soit laminaire ou turbulent.

Régimes d'écoulement	
Régime laminaire	Régime turbulent
il est caractérisé par la formation de lames de fluide qui se déplacent parallèlement par rapport à la direction de l'écoulement.	il est caractérisé par la formation de petits tourbillons repartis dans toute la masse du fluide.
V = 0 sur les parois du tube. V =Maxi au centre du tube.	V = V _{moy} le long du tube.

Tableau I.1 : principales caractéristiques des régimes d'écoulement.

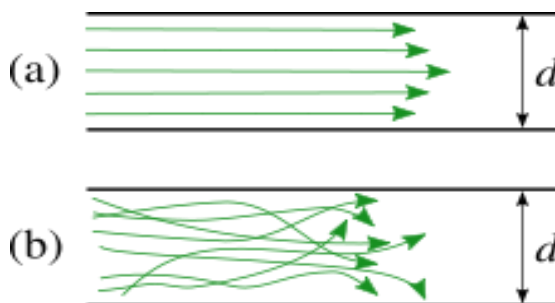


Figure I.5 :Régime laminaire (a),régime turbulent(b).

- **Nombre de Reynolds R_e [1]**

A partir du régime laminaire, on peut passer à un régime turbulent et ça en augmentant progressivement la vitesse relative de l'écoulement.

Au fur et à mesure les différentes couches du régime laminaire se rejoignent, se mélangent et disparaissent, laissant apparaître le régime turbulent.

Le passage du régime laminaire au turbulent se fait lorsque la valeur R_e , dit **nombre de Reynolds** atteint et dépasse sa valeur critique R_{ec} .

Le nombre de Reynolds est défini comme il suit :

$$R_e = (\vec{v} \cdot l) / \nu = \rho \cdot \vec{v} \cdot l / \mu \tag{I.1}$$

Ou :

\vec{v} : La vitesse moyenne de l'écoulement $[\vec{v}] = L \cdot T^{-1}$.

l : La longueur caractéristique du rhéomètre $[l] = L$.

ν : viscosité cinématique du fluide $[\nu] = L^2 \cdot T^{-1}$.

ρ : masse volumique $[\rho] = M \cdot L^{-3}$.

μ : viscosité dynamique $[\mu] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$.

- Si $R_e > R_{ec}$ **régime turbulent.**
- Si $R_e < R_{ec}$ **régime laminaire.**

- **Remarque**

- Le nombre de Reynolds est sans dimension.
- En connaissant R_{ec} , il est plus facile de rester en régime laminaire, et ça en déduisant la vitesse moyenne d'écoulement limite.

$$V_{limite} = (R_{ec} \cdot \nu) / l \quad (I.2)$$

I.5. Mouvement laminaire de cisaillement [1]

Un mouvement laminaire de cisaillement est un mouvement au cours duquel le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes, d'épaisseurs infiniment minces, la déformation du matériau s'effectue par un glissement relatif des différentes couches les unes sur les autres, sans qu'il y ait de transfert de matière d'une couche à l'autre, c'est un mouvement strictement ordonné et stratifié qui se produit sans brassage du matériau et sans variation de son volume.

Les mouvements des différents points du matériau et la forme des couches dépendent en premier lieu des conditions expérimentales : la géométrie du problème, les intensités des forces appliquées et leurs répartitions.

a) Contrainte de cisaillement τ [1]

Durant un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, ce sont les forces de cisaillement.

- **Illustration**

En observant deux couches successives 1 et 2, de vitesses parallèles \vec{v}_1 et \vec{v}_2 , et en supposant que $|v_1| > |v_2|$, les deux couches exercent l'une sur l'autre une force de cisaillement dF parallèle au mouvement, telle que la couche 1 tend à accélérer la couche 2, tandis que celle-ci tend à la ralentir (des forces de cisaillement de même intensité et de directions opposées).

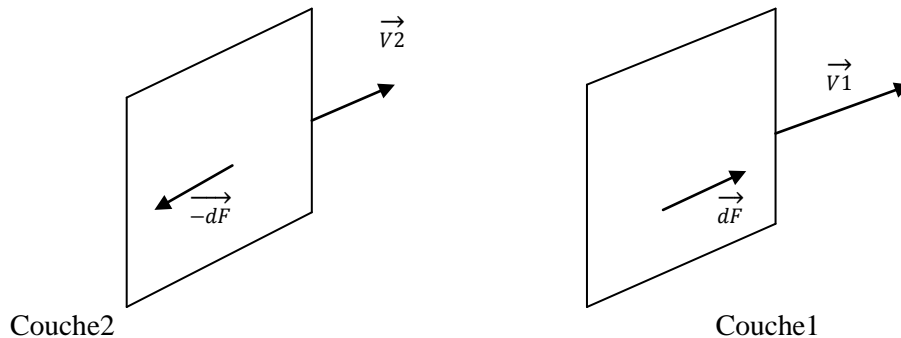


Figure I.6 : Représentation de la contrainte de cisaillement.

En résumé, on peut dire que la contrainte de cisaillement τ est la force exercée par unité de surface du fluide :

$$\tau = dF/dS \quad (I.3)$$

Où:

τ : contrainte de cisaillement, s'exprime en pascals, newton/m² dans le système MKSA ou bien en dynes/cm² dans le système CGS.

dS : surface élémentaire d'une couche cisillée.

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

- **Remarques**

- La contrainte de cisaillement τ est la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie.
- τ est définie en tout point du matériau, et varie d'une couche à l'autre tout en restant constante en tout point de la même couche.
- Les couches exercent entre elles d'autres forces comme les contraintes normales, qui agissent perpendiculairement à leurs surfaces.

- Chaque fluide possède une contrainte de cisaillement seuil, si la contrainte appliquée au fluide est inférieure à cette contrainte seuil, aucune déformation ne se produit, le fluide ne coule pas.

b) Déformation de cisaillement γ [1]

Envisageons le cas particulier où le mouvement laminaire de cisaillement présente une symétrie plane, le cas où le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre fixe.

A un instant $t \neq 0$ chaque particule se déplace d'une distance $u(x,t)$, x représentant la distance séparant la particule de matière du plan solide inférieur et permet ainsi de repérer les couches.

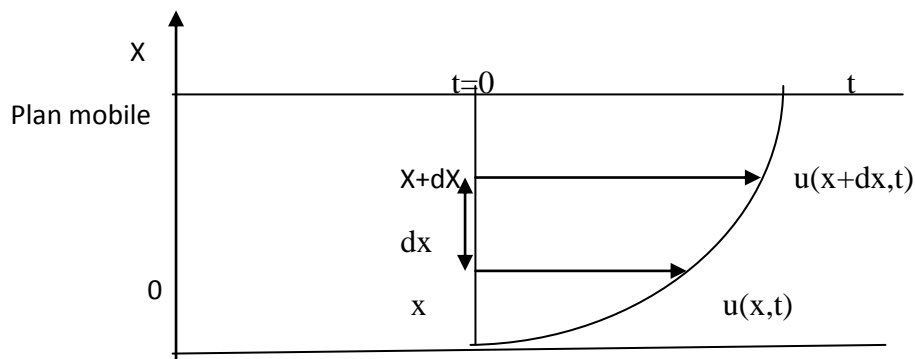


Figure I.7 : Représentation de la contrainte de cisaillement dans le cas de la symétrie plane.

La déformation de cisaillement est définie dans ce cas par :

$$\gamma(x,t) = du(x,t) / dx \quad (I.4)$$

γ : la déformation de cisaillement est une grandeur sans dimension.

On remarque que cette grandeur ne dépend pas directement du déplacement, mais de la variation de ce dernier lorsqu'on passe d'une couche à une autre infiniment voisine.

Géométriquement on peut écrire :

$$\gamma(x,t) = \tan \alpha(x,t) \quad (I.5)$$

$\alpha(x,t)$: Angle que fait la tangente en x à la courbe joignant les extrémités des vecteurs de déplacement $u(x,t)$ et à l'axe des x .

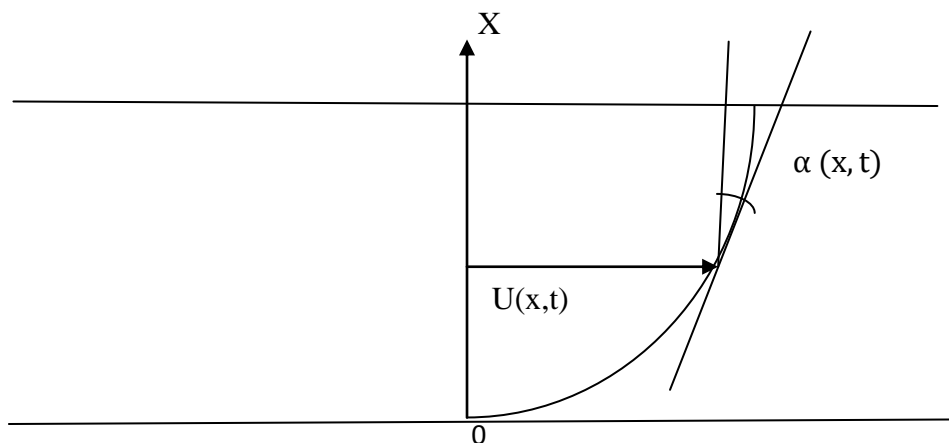


Figure 1.8: Représentation de l'angle $\alpha(x, t)$ que fait la tangente en x à la courbe joignant les extrémités des vecteurs de déplacement $u(x, t)$ et à l'axe des x .

c) vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ [1]

Par définition, la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ est la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement γ .

$$\dot{\gamma} = d\gamma/dt \quad (\text{I.6})$$

$\dot{\gamma}$: La vitesse de cisaillement s'exprime en s^{-1} .

En se ramenant au cas de symétrie plane cette relation peut s'écrire :

$$\dot{\gamma} = \frac{d}{dt} \frac{du}{dx} = \frac{d}{dx} \frac{du}{dt} \quad (\text{I.7})$$

On a :

$$v(x, t) = \frac{d}{dt} \frac{du}{dx} \quad (\text{I.8})$$

Donc au finale on peut écrire que :

$$\dot{\gamma} = dv(x, t)/dx \quad (\text{I.9})$$

Cette équation a valeur à la vitesse de cisaillement l'appellation de gradient des vitesses, en effet toujours dans le cas de la symétrie plane ou le matériau est cisailé entre deux plans

séparer d'une distance h , un mobile l'autre est déplacé d'une distance dx à une vitesse constante V_0 .

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche se déplace à la même vitesse, les couches inférieures vont se déplacer dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Ainsi est créé un gradient de vitesse. [4]

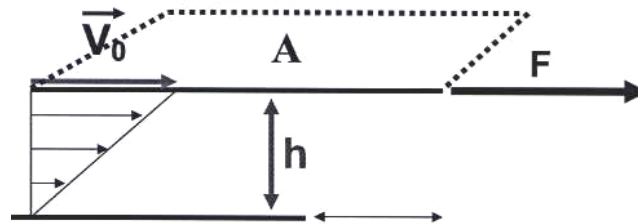


Figure I.9: Concept de la vitesse de cisaillement.

I.6. Viscosités

On considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles. Soumise à une contrainte tangentielle, une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente; en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue.

Cet effet de retard, provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé la viscosité. [4]

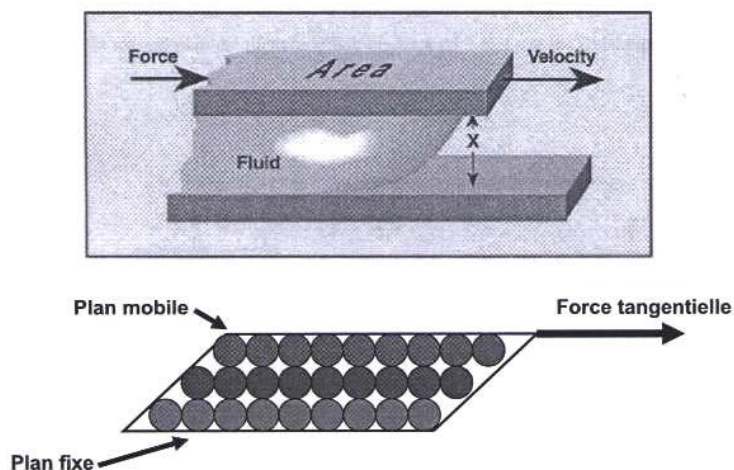


Figure I.10: Schéma du glissement des couches.

La viscosité (du latin viscum) peut être définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière.

En rhéologie, les grandeurs physiques que sont les coefficients de viscosités jouent un rôle très important, parfois leur connaissance suffit à caractériser le comportement rhéologique du matériau de façon précise. [1]

On peut définir plusieurs coefficients de viscosité, on se limitera à ceux qui suivent:

a) viscosité dynamique [1]

Appeler aussi viscosité apparente, elle est définie par la relation :

$$\mu = \tau / \dot{\gamma} \quad (\text{I.10})$$

μ : viscosité dynamique, exprimée en poise (P) dans le système CGS, et le pascal seconde (Pa.s) dans le système MKSA, pendant longtemps l'unité MKSA a été appelée le Poiseuille et notée PI.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ PI} = 10 \text{ P}$$

$\dot{\gamma}$: La vitesse de cisaillement s'exprime en s^{-1} .

τ : contrainte de cisaillement, s'exprime en pascals, newton/m² dans le système MKSA ou bien en dynes/cm² dans le système CGS.

b) Viscosité cinématique [1]

Elle est égale au rapport de la viscosité dynamique par la masse volumique du fluide considéré. Elle est définie par la relation :

$$\nu = \mu / \rho \quad (\text{I.11})$$

ν : viscosité cinématique son unité est le cm²/s encore appelée stokes (st) dans le système CGS, le m²/s dans le système MKSA.

ρ : la densité du fluide exprimé en Kg/m³, g/cm³.

μ : viscosité dynamique, exprimée en poise P, et le pascal seconde Pa.s.

Remarque

La viscosité dépend fortement de la température T et de la pression P extérieures. Aussi doit-on toujours, pour conserver un sens à la mesure, préciser T et P à laquelle elle a été faite, elle dépend aussi de la contrainte de cisaillement τ et de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$.

On peut donc écrire que : $\mu = F(T, P, \tau)$, ou bien $\mu = G(T, P, \dot{\gamma})$.

I.7. Equation rhéologique d'état [1]

En rhéologie il existe une relation entre la déformation de cisaillement γ et la contrainte de cisaillement τ . Pour ce type de fluide, elle dépend de la nature et des propriétés du matériau, cette relation est appelée équation rhéologique d'état, sa connaissance détermine toutes les propriétés rhéologiques du matériau. Elle est notée :

$$\gamma = f(\tau) \quad (\text{I.12})$$

Remarque

- L'équation rhéologique d'état ne dépend pas uniquement de la nature et des propriétés du matériau ; elle dépend aussi de la température T et de la pression P . Il est plus correct d'écrire :

$$\gamma = f(\tau, T, P) \quad (\text{I.13})$$

- Pour un très grand nombre de substances dites douées de mémoire, $\gamma(t)$ dépend de la contrainte de cisaillement appliquée à un instant t mais aussi de celles appliquées antérieurement à t .

I.8. Rhéogrammes [1]

Les équations rhéologiques d'états sont traduites graphiquement par des courbes qu'on appelle rhéogrammes. Les plus utilisés sont :

- Les graphes τ, γ , à pression et température extérieures constantes.
- Les graphes $\tau, \dot{\gamma}$, à pression et température extérieures constantes.
- Les graphes γ, t , traduisant l'évolution de γ au cours du temps, à pression et température extérieures constantes, lorsque la contrainte de cisaillement est appliquée à l'instant $t=0$ et maintenue constante (expérience du fluage).
- Les graphes γ, t , traduisant l'évolution de γ au cours du temps, à pression et température extérieures constantes, lorsqu'une déformation est imposée à l'instant $t=0$ et maintenue constante (expérience de relaxation).

I.9. Comportements rhéologiques [1]

I.9.1- Fluides Newtoniens

Pour ce type de fluide, la viscosité est indépendante de la contrainte appliquée, on parle alors de fluide parfait ou linéaire.

La contrainte de cisaillement τ est directement proportionnelle au taux de cisaillement $\dot{\gamma}$.

Le rapport $\tau / \dot{\gamma}$ est constant à température et pression constante : c'est la viscosité.

L'équation rhéologique est :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{I.14})$$

τ : contrainte de cisaillement, en pascals, newton/m² ou bien en dynes/cm².

μ : viscosité dynamique, exprimée en poise P, et le pascal seconde Pa.s.

$\dot{\gamma}$: La vitesse de cisaillement, s⁻¹.

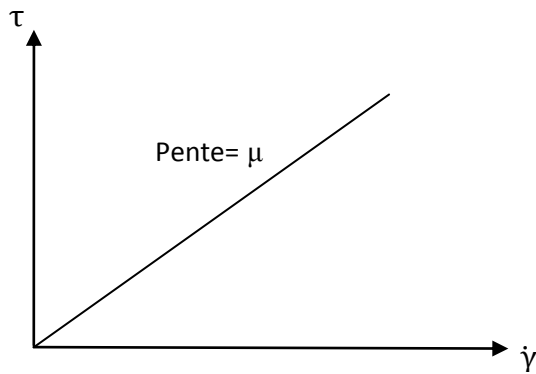


Figure I.11 : Rhéogramme d'un liquide newtonien.

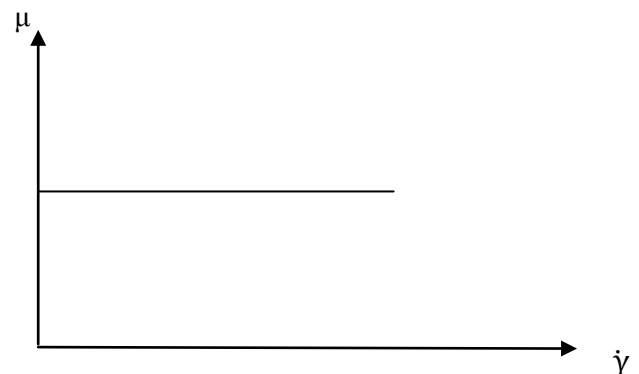


Figure I.12 : Viscosité d'un fluide newtonien.

I.9.2- Fluides non Newtoniens [1]

Pour ces fluides, le rapport de la contrainte de cisaillement τ par la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ varie avec τ ou $\dot{\gamma}$ et avec le temps.

Ils sont caractérisés par la relation générale suivante :

$$\tau = \mu_a \dot{\gamma} \quad (\text{I.15})$$

μ_a : viscosité apparente dépendante de la vitesse de cisaillement exprimée en Pa.s.

a) Fluides fluidifiants

Appelés aussi fluides rhéofluidifiants ou bien fluides pseudoplastiques, leur viscosité diminue quand la contrainte augmente

C'est l'ensemble de tout les corps dont les rhéogrammes sont des courbes passant par l'origine et dont la concavité est tournée vers le bas. Ce type de comportement est très fréquent il concerne les dispersions de particules asymétriques, colles, les ciments, les pates a papiers...

Leur comportement ne peut pas être décrit d'une manière très précise, malgré le nombre considérable d'équation qui les représentent, on peut citer à titre d'exemple:

- La loi de puissance par Ostwald en 1992

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.16})$$

n : Indice de pouvoir d'écoulement inférieur a 1.

$\dot{\gamma}$: La vitesse de cisaillement, s^{-1} .

K : Indice de consistance du matériau.

τ : Contrainte de cisaillement, en pascals, newton/m² ou bien en dynes/cm².

- La loi de puissance par Herschell Berkeley :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.17})$$

τ : contrainte de cisaillement, en pascals, newton/m² ou bien en dynes/cm².

τ_0 : Contrainte seuil de cisaillement en Pa, N/m², dynes/cm².

μ : La viscosité dynamique, P, Pa.s.

$\dot{\gamma}$: La vitesse de cisaillement, s^{-1} .

n : Indice de pouvoir d'écoulement inférieur a 1.

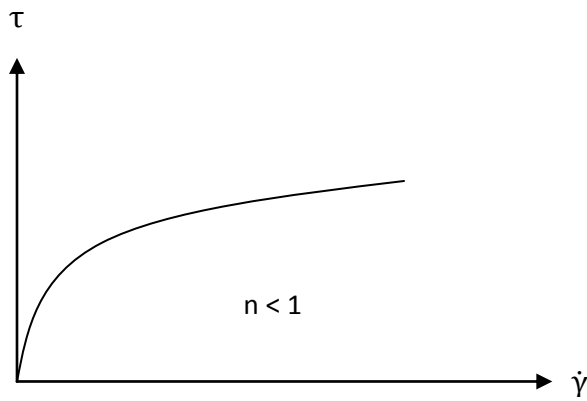


Figure I.13 : Rheogramme d'un corps fluidifiant.

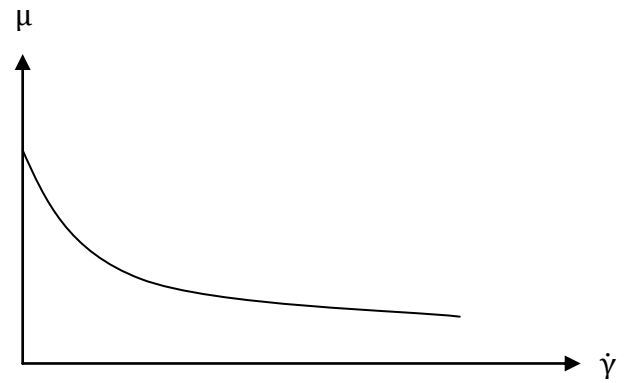


Figure I.14: Variation de la viscosité d'un corps fluidifiant.

b) les fluides épaisissants

Appelés aussi fluides rhéoépaississants, leur viscosité accroît lorsque la contrainte de cisaillement augmente.

C'est l'ensemble de tout les corps dont les rhéogrammes sont des courbes passant par l'origine et dont la concavité est tournée vers le haut. Ce comportement est moins fréquent que le comportement rhéofluidifiant, il concerne les dispersions très concentrées, des sables mouvants, des solutions d'amidon...

Ils peuvent être approximer par une simple loi de puissance :

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.18})$$

n : un exposant supérieur a 1.

τ : contrainte de cisaillement, en pascals, newton/m² ou bien en dynes/cm².

K : indice de consistance du matériau.

$\dot{\gamma}$: La vitesse de cisaillement en s⁻¹.

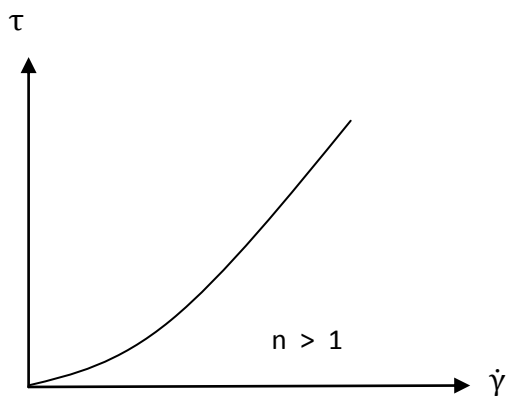


Figure I.15 : Rhéogramme d'un corps rhéoépaississant.

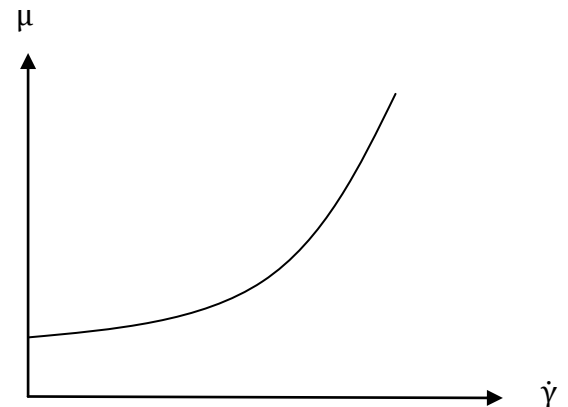


Figure I.16 : Variation de la viscosité d'un fluide rhéofluidifiant.

Un grand nombre de ces liquides est en même temps dilatant, lorsqu'ils sont soumis à une déformation leur volume augmente.

c) Fluides Binghamiens [1]

Pour les fluides plastique binghamiens la contrainte de cisaillement varie linéairement avec la vitesse de cisaillement, à la différence des fluides newtoniens, il est nécessaire d'appliquer une force minimale pour mettre le fluide en mouvement. Cette force est appelée limite de cisaillement yield point ou yield value.

Ils sont caractérisés par deux constantes :

τ_0 : La tension de cisaillement, c'est la force minimale à appliquée pour avoir un écoulement.

μ_p : la viscosité plastique, elle correspond à la pente de la courbe représentant τ en fonction de $\dot{\gamma}$.

Les fluides plastiques de bingham sont définis par la relation suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (\text{I.19})$$

τ : contrainte de cisaillement, en pascals, newton/m² ou bien en dynes/cm².

τ_0 : La tension de cisaillement, en pascals, newton/m² ou bien en dynes/cm².

μ_p : La viscosité plastique, exprimée en poise P, et le pascal seconde Pa.s.

$\dot{\gamma}$: La vitesse de cisaillement, s⁻¹.

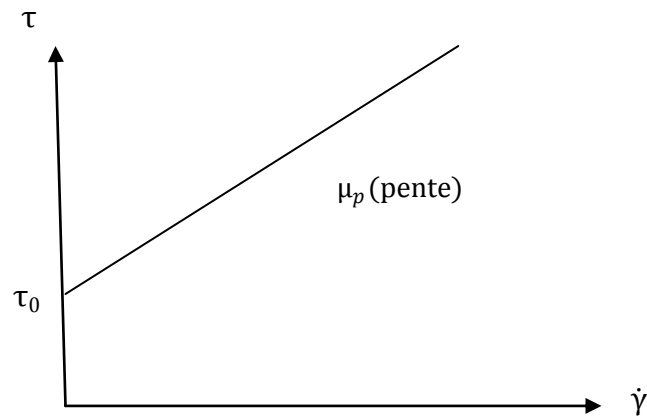


Figure I.17: Rhéogramme d'un fluide de Bingham.

d) Fluides d'Ostwald

Les fluides pseudos plastiques se mettent en mouvement dès qu'on leur applique une force de cisaillement même très faible.

La contrainte de cisaillement n'est pas proportionnelle à la vitesse de cisaillement mais à sa puissance $n^{\text{ième}}$, d'où l'appellation fluides en puissance. [5]

Ils sont représentés par l'équation suivante :

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.20})$$

τ : contrainte de cisaillement, en pascals, newton/m² ou bien en dynes/cm².

K : indice de consistance du matériau, braye.sⁿ.

$\dot{\gamma}$: La vitesse de cisaillement, s⁻¹.

n : indice de pouvoir d'écoulement, sans dimension.

Selon la valeur de "n", trois profils d'écoulement de fluide apparaissent:

1. $n < 1$: Le fluide est rhéofluidifiant.
2. $n = 1$: Le fluide est newtonien.
3. $n > 1$: Le fluide est dilatant.

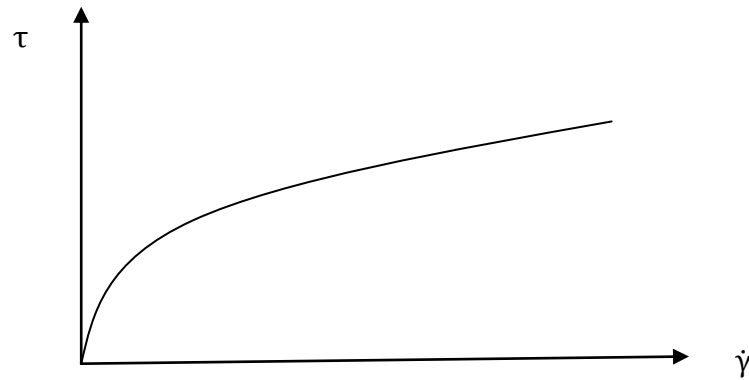


Figure 1.18 : Rhéogramme d'un fluide d'Ostwald.

e) la thixotropie et l'antithixotropie

- la thixotropie

Certains liquides peuvent présenter un écoulement dont les caractéristiques dépendent du temps ou des traitements antérieurs (fluides à mémoire). Ils sont caractérisés par une diminution réversible de la viscosité apparente lors d'une sollicitation à vitesse constante. Les rhéogrammes de telles suspensions présentent une boucle d'hystérésis, c'est à dire que la courbe de montée en cisaillement ne coïncide pas avec la courbe de descente.

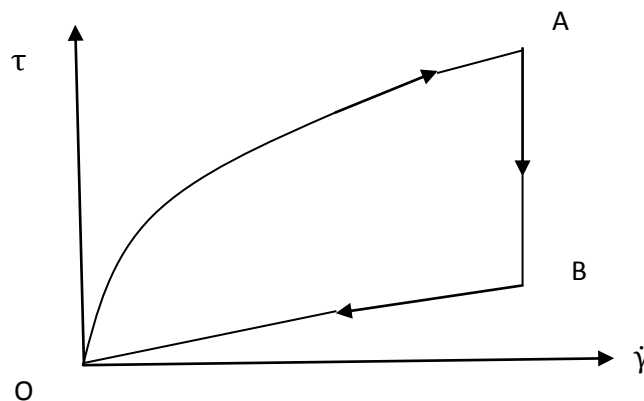


Figure 1.19 : Boucle d'hystérésis de référence d'un gel rhéofluidifiant.

OA : la courbe caractéristique du comportement rhéofluidifiant.

AB : sous cisaillement maximale, la viscosité apparente diminue progressivement, ça correspond a un changement de structure.

BO : la structure étant complètement détruite la viscosité redevient constante ce qui explique le retour linéaire.

Après suppression du cisaillement et un temps de repos suffisant, le corps retrouve sa structure initiale.

- **L'antithixotropie**

C'est l'effet inverse de la thixotropie.

A contrainte τ ou $\dot{\gamma}$ données, la viscosité apparente du corps augmente avec le temps.

Remarque

Les fluides non Newtonien les plus utilisés sont : les fluides Binghamien, et les fluides d'Ostwald.

I.10.Appareils utilisés en rhéologie

Comme toute discipline scientifique qui se respecte, la rhéologie possède elle aussi des équipements spécifiques consacrés à la caractérisation et la détermination du comportement rhéologique des différents matériaux qui constituent son large champ d'étude.

L'outil principalement utilisé en rhéologie est le rhéomètre. Il en existe différents types sur le marché, selon les conditions expérimentales à appliquer, les paramètres recherchés, le régime de fonctionnement, le type du matériau étudié ...

Nous pouvons distinguer trois types de rhéomètres :

1. Les rhéomètres à régime permanent, fonctionnant essentiellement en viscosimètres pour déterminer les viscosités et les rhéogrammes τ - $\dot{\gamma}$ de substances liquides.
2. Les rhéomètres à régime transitoire qui permettent l'étude des propriétés viscoélastiques des matériaux.
3. Les rhéomètres dynamiques fonctionnant en régime sinusoïdal et fournissant une description très complète des propriétés rhéologiques des substances.

Certains rhéomètres sont susceptibles de fonctionner aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire, à condition de leur adjoindre des équipements accessoires.

I.10.1. Rhéomètres à régime permanent [1]

Dans ces rhéomètres la substance étudiée est soumise à un mouvement laminaire de cisaillement indépendant du temps, les différentes couches s'écoulent sans que la vitesse et la contrainte de cisaillement ne changent dans le temps.

Ces rhéomètres sont donc utilisés pour l'étude des substances possédant un comportement liquide, capable de suivre un processus d'écoulement permanent.

L'objectif expérimental recherché est la détermination du rhéogramme τ - $\dot{\gamma}$ de ces liquides.

On y trouve les rhéomètres de type Couette, de type Poiseuille, et le viscosimètre à chute de bille.

a) Rhéomètres de type Couette

La substance étudiée est cisailée entre deux surfaces solides, l'une au repos, l'autre en mouvement.

➤ Rhéomètres plans à translation

La substance étudiée est placée entre deux plans P1, P2 parallèles et de même surface S. Une force \vec{F} constante est appliquée tangentiellement au plan mobile P2, ce qui lui confère un mouvement de translation parallèle à lui-même, de vitesse \vec{V}_0 le plan P1 demeure fixe.

Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré si l'on suppose que la distance e entre les plans est faible devant les dimensions linéaires de la surface S des plans, et en négligeant les effets de bord, on admet que l'écoulement possède une symétrie plane et que le matériau se décompose en plans parallèles aux surfaces P1, P2 animées respectivement de vitesse 0 et \vec{V}_0

Le problème qui se pose est de calculer la contrainte et la vitesse de cisaillement en chaque point de l'échantillon à partir des grandeurs physiques accessibles expérimentalement, la force \vec{F} appliquée au plan P2 et la vitesse correspondante.

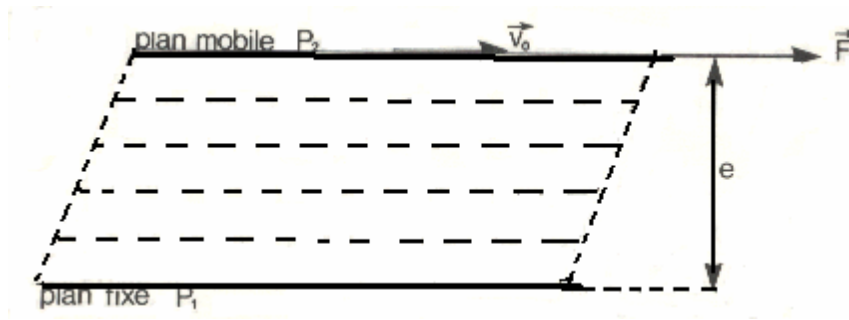


Figure I.20 : Schéma d'un rhéomètre plan à translation.

Les rhéomètres plans sont peu nombreux, et souvent peu précis, c'est pour ça qu'ils sont généralement utilisés pour des contrôles grossiers.

Ils sont classés en deux catégories :

- Appareils à lames, utilisés pour la mesure de viscosités de 1 à $3 \cdot 10^3$ Pa.s.
- Appareils à plaques, utilisés pour la mesure de viscosités de 10 à 10^{10} Pa.s.

➤ Rhéomètres rotatifs cylindriques

La substance étudiée est emprisonnée entre deux cylindres de révolution, coaxiaux de rayons R_1 et R_2 , et de hauteur h .

Le régime laminaire est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire ω_0 , l'autre reste immobile (Le cylindre mobile peut être, le cylindre intérieur ou bien celui de l'extérieur).

La substance se décompose en couches cylindriques coaxiales, animées de vitesse angulaire différentes, variant de 0 pour la couche en contact avec le cylindre immobile à ω_0 pour celle en contact avec le cylindre mobile.

A la suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ et une contrainte de cisaillement τ .

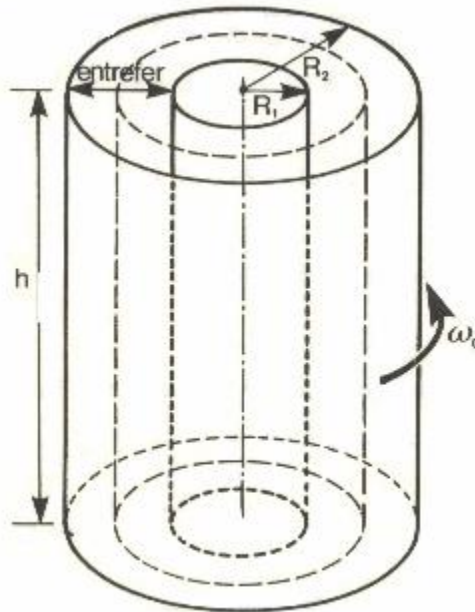


Figure I.21 : Représentation d'un rhéomètre rotatif cylindrique.

Les rhéomètres rotatifs sont très nombreux et fréquemment utilisés, ils sont le plus souvent automatisés ce qui permet l'enregistrement graphique direct des rhéogrammes τ - $\dot{\gamma}$. On distingue :

- Les appareils à vitesse de rotation ω_0 imposée.
- Les appareils à couple M imposé.

Suivant les caractéristiques des rhéomètres utilisés, on peut étudier des substances de viscosités très variables, elles peuvent s'étendre de 10^{-3} Pa.s à 10^4 , et de 10^{-3} Pa.s à 10^7 Pa.s.

Leurs principaux inconvénients résident dans le fait d'avoir besoin d'un volume important d'échantillon et l'impossibilité d'étudier des substances à très haute viscosité (plus de 10^7 Pa.s).

➤ Rhéomètres rotatifs à cône/plateau

La substance étudiée est emprisonnée entre un plateau et un cône de révolution de rayon R , dont l'axe est perpendiculaire au plan du plateau, et dont le sommet est situé sur le plateau.

L'angle ψ entre la génératrice du cône et le plateau est petit, il est toujours inférieur à 5° et peut descendre jusqu'à 0.3° .

Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant au cône une vitesse de rotation constante ω_0 , le plateau quand a lui demeure fixe.

La substance se décompose en couches qui sont constituées par des cônes de révolution de même sommet et axe que le cône solide, animées de différentes vitesses angulaires de rotation, variantes de 0 pour celles en contact avec le plateau a ω_0 pour celles en contact avec le cône solide.

On peut imposer au cône soit un couple de rotation connu, puis on mesure alors vitesse angulaire de rotation ω_0 , ou bien le contraire, on impose une vitesse de rotation angulaire ω_0 , puis on mesure le couple de rotation correspondant.

A la suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparait en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ et une contrainte de cisaillement τ .

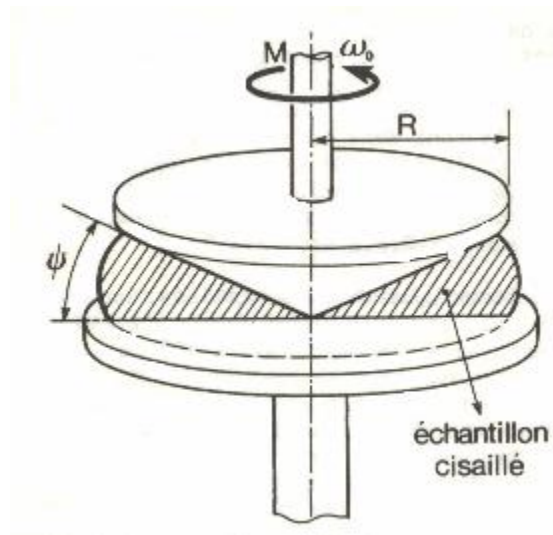


Figure I.22 : Représentation d'un rhéomètre rotatif a cône plateau.

Les rhéomètres rotatifs a cône /plateau sont moins nombreux que les rhéomètres cylindriques, ils ont une très bonne précision et ne requiert qu'un faible volume d'échantillon et permet d'atteindre des vitesses de cisaillement élevées.

La gamme des viscosités qui peuvent être mesurées est voisine de celle des rhéomètres cylindriques (de 10^{-3} Pa.s à 10^4 , de 10^{-3} Pa.s a 10^7 Pa.s).

Comme inconvénients on peu indiquer que, la symétrie conique de l'écoulement laminaire peu être très sensible, surtout a sommet du cône, en plus du fait que cet appareils ne convient

pas a l'étude des matériaux aux structures complexe et fragile qui pourrait être endommager dans le petit volume compris entre le cône et le plateau.

b) Rhéomètres de type Poiseuille

Le mouvement laminaire de cisaillement est engendré par l'application aux extrémités d'un tube cylindrique de faible section circulaire contenant l'échantillon d'une différence de pression ou encore par la simple action de la pesanteur.

La différence de pression tend à entrainer le matériau dans un mouvement d'ensemble dans le sens des pressions décroissantes. Ce mouvement d'ensemble est contrarié par le frottement exercé par les parois du tube sur la couche de substance directement en contact, c'est pour ça que le matériau se décompose en couches cylindriques coaxiales de même axe que le tube, animées de vitesses différentes. la couche limite reste au repos.

L'utilisation des rhéomètres de type Poiseuille est spécifiée pour les liquides ayant un comportement newtoniens ou bien très peu différent de celui-ci, ils peuvent aussi être utilisés pour les liquides non newtonien à condition que leurs propriétés rhéologiques soit indépendantes du temps.

Les rhéomètres de type Poiseuille sont devisés principalement en deux catégories :

- Les rhéomètres capillaires verticaux de type Ostwald, l'écoulement est causé par la simple pesanteur, essentiellement utilisés pour l'étude des liquides newtoniens de faible viscosité.
- Les rhéomètres verticaux ou horizontaux, par l'intermédiaire d'un gaz, un piston, une pompe..., on applique une pression motrice susceptible de varier. ils sont utilisés pour l'étude de liquides plus visqueux de 10^{-2} Pa.s a 10^7 Pa.s.

c) viscosimètres à chute de bille

Une sphère solide rigide de rayon R et de masse volumique ρ_s , tombe sous l'effet de la gravité dans le liquide newtonien étudié, de masse volumique ρ et de coefficient de viscosité μ .

Cette bille est soumise à une force de gravité(en verre), à la poussée d'Archimède(en bleu) et à une force de cisaillement(en noir) provoqué par le liquide sur la surface de la sphère.

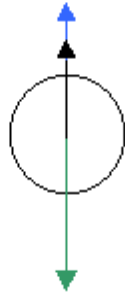


Figure I.23 : Représentation des forces subie par la bille.

Lorsque le régime permanent est atteint, la sphère acquiert une vitesse limite constante.

Pour pouvoir déterminer μ il faut déterminer la vitesse limite de la bille.

Les viscosimètres à chute de bille sont utilisés pour l'étude des liquides rigoureusement newtoniens.

I.10.2- Rhéomètres a régime transitoire

Ces rhéomètres permettent de déterminer le comportement viscoélastique des matériaux aussi bien liquides que solides.

Dans ce type de rhéomètres l'échantillon est soumis à une sollicitation instantanée qui est maintenue constante, et on étudie son comportement dans les instants qui suivent.

Avant que le régime permanent ne s'établisse, le matériau manifeste un comportement dépendant du temps, et l'étude de ce régime transitoire permet la détermination de ses propriétés viscoélastiques.

On rencontre deux types de rhéomètres transitoires : les rhéomètres à fluage et les rhéomètres à relaxation.

a) Rhéomètres à fluage

L'échantillon dans ce cas est soumis à une contrainte de cisaillement d'amplitude constante τ à partir de l'instant initial $t = 0$. La déformation de cisaillement correspondante $\gamma(t)$ est

mesurée, on en déduit alors la fonction de fluage $f(t)$, ce qui permet la détermination des propriétés viscoélastiques du matériau.

$$F(t) = \gamma(t) / \tau \quad (\text{I.21})$$

Un rhéomètre à fluage est capable d'imposer une contrainte de cisaillement τ , connue ; de mesurer la déformation de cisaillement $\gamma(t)$ correspondante et d'en suivre l'évolution dans le temps.

Les rhéomètres à fluage les plus répandus sont les rhéomètres rotatifs : cylindriques, les rhéomètres à plateau/plateau utilisés pour l'étude de matériaux très consistants des liquides très pâteux ou bien solides, les rhéomètres à cône/plateau recommandé pour les matériaux plus fluides, ils assurent une meilleure constance de la contrainte de cisaillement τ dans l'espace.

Ce type de rhéomètres permettent de mesurer des coefficients de viscosités extrêmement élevés pouvant atteindre 10^{11} Pa.s.

b) Rhéomètres à relaxation

Une expérience de relaxation consiste à soumettre l'échantillon initialement au repos à une déformation instantanée qu'on maintient constante et à enregistrer l'évolution des contraintes au cours du temps.

Les tests de fluages des avantages et limites en particulier, la facilité d'analyse pour un spectre de temps de relaxation discret, et réduit, et la difficulté d'analyse dans le cas d'une distribution rapprochée ou bien continue.

I.10.3- Rhéomètres dynamiques (ou oscillants)

Dans ces rhéomètres les échantillons étudiés sont soumis à des mouvements laminaires de cisaillement d'amplitude variant sinusoïdalement dans le temps.

On distingue deux types d'appareils selon que le mouvement est entretenu ou non :

- Les rhéomètres à oscillations forcées qui peuvent fonctionner dans toute une gamme de fréquences ou à une seule en particulier.
- Les rhéomètres à oscillations libres qui permettent de mesurer de faibles viscosités en mesurant un amortissement.

a) Rhéomètres à oscillations forcées**➤ Rhéomètres à plateaux**

L'échantillon est maintenu entre les deux plateaux par capillarité, l'un des plateaux supporte une grande masse qui l'immobilise.

La force et le déplacement sont transformés en tension par transducteurs électromagnétiques (T.E.M).

Le déphasage est lu à l'oscilloscope, on peut faire varier la fréquence le plus souvent dans le domaine de 10 à 1000 Hz.

➤ Rhéomètres à cylindres en translation

Ils ont le même principe mais utilisent une géométrie différente, les deux faces de l'entrefer sont deux cylindres concentriques, l'un est fixe, l'autre a un mouvement de translation sinusoïdal suivant l'axe.

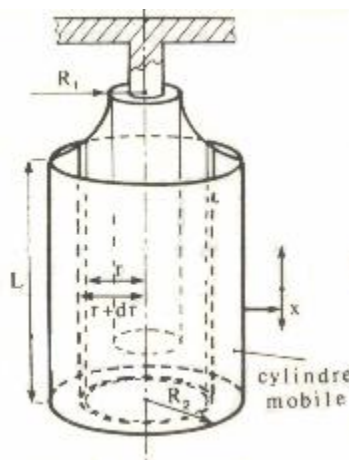


Figure I.24 : Schéma d'un rhéomètre cylindrique en translation.

Ces rhéomètres permettent la mesure de la force sur la face immobile, ils sont peu précis du fait que la contrainte est déterminée expérimentalement.

➤ Rhéomètres cylindriques oscillants

Ce sont des rhéomètres cylindriques sur lesquels on peut imprimer au rotor des mouvements oscillatoires de fréquences généralement comprises entre le dixième et la dizaine d'hertz avec des amplitudes de quelques centièmes de radians.

➤ **Rhéomètres cône/plateau**

Ce sont des rhéomètres pouvant fonctionner en dynamique pour des fréquences de $3 \cdot 10^{-4}$ Hz à 50 Hz, et des amplitudes d'oscillations de 0.002 rad à 0.03 rad.

➤ **Rhéomètres plateau/plateau**

Aussi utilisé en essais dynamiques, son avantage est de faire varier la distance entre les plateaux très facilement.

Ce sont des rhéomètres à fréquences variable les plus précis, cependant cette précision décroît avec la fréquence.

b) Rhéomètres utilisés à la résonance

Certains rhéomètres, dont le principe est celui des oscillations forcées, ne permettent des mesures de l'amplitude de la force et celle du déplacement qu'à une seule fréquence, la fréquence de résonance.

➤ **Rhéomètres cylindriques résonants**

Il s'agit d'un rhéomètre cylindrique mis en oscillation en utilisant un cadre parcouru par un courant alternatif de fréquence variable et placé dans un champ magnétique.

Le cylindre mobile plonge dans le liquide étudié contenu dans une cuve cylindrique. Il suffit alors de chercher expérimentalement la fréquence du courant à la résonance.

bonne précision, mais ils ne travaillent pas à fréquence variable, ils ne peuvent pas servir à une

Ces appareils sont simples, et précis, généralement la résonance est déterminée avec une très étude complète de la viscoélasticité.

c) Les appareils à oscillations libres

Les appareils de ce type sont des rhéomètres cylindriques, dont le cylindre intérieur est rappelé par un fil de torsion auquel il est suspendu. On enregistre le déplacement angulaire de ce cylindre.

Ces rhéomètres sont utilisés pour des corps newtoniens de faible viscosités liquides et gaz pour lesquels il est plus facile de mesurer un amortissement qu'un couple.

Les rhéomètres dynamiques ne sont d'un emploi simple que si l'inertie de l'échantillon est négligée, en générale en diminuant l'entrefer elle diminue.

II.1. Introduction

Le mot tribologie, vient du Grec Tribein (tribo) qui signifie (gratter, frotter) et logos parole (étude ou science) créé à l'instigation des Anglais en 1968.

Au début du vingtième siècle, la tribologie s'appuyait sur l'étude des volumes, avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement. Au milieu du même siècle, la tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Depuis une vingtaine d'années, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments interraciaux dans un contact.

II.2. Définition de la tribologie

D'après G. Salomon (1968) la tribologie est la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. Plus généralement la tribologie regroupe l'étude de la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact, du frottement qui est la résistance à un déplacement imposé et de l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière.

C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physico-chimie et de science des matériaux en général.

La tribologie intéresse tous les domaines d'activité car l'univers technique qui nous environne est essentiellement régi par des contacts. [6]

La tribologie est la science qui étudie les aspects positifs du frottement (les processus d'usinage et la fabrication...) aussi bien que les aspects négatifs (l'usure, les bruits engendrés et les vibrations...).

II.3. Importance de la tribologie

La tribologie se propose d'étudier non seulement les conditions de frottement entre les corps, mais également les divers phénomènes et aspects physiques et techniques dans le déplacement relatif des surfaces extérieures des corps, elle étudie donc les divers types de frottement, les mécanismes d'usure et les moyens pour les éviter.

Alors on peut dire que, si la mécanique est la science du mouvement, la tribologie est la science qui permet le mouvement.

Elle s'intéresse à l'étude et à l'interprétation scientifique des faits expérimentaux, elle entre en jeu de façon significative dans de nombreux domaines industriels.

La connaissance de la tribologie est devenue une nécessité pour de multiples raisons

- Améliorer la qualité du fonctionnement et la fiabilité des machines.
- Diminuer le coût d'obtention des surfaces flottantes.
- Augmenter le rendement et minimiser les pertes d'énergies.
- Prolonger la durée de vie.
- Assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine de transport.
- Atteindre des vitesses plus élevées.
- Améliorer la lubrification.

II.4. Système tribologique

Un système tribologique ou tribosystème se définit comme un système mécanique, composé de 4 éléments principaux représentés dans la (figure II.1) : deux matériaux antagonistes en contact, corps (1) et (2), ils évoluent dans un milieu ambiant (environnement 4) et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps.

Sur le plan tribologique, le troisième corps est un opérateur qui transmet la charge d'un corps à l'autre et accommode en s'écoulant d'une façon dissipative l'essentiel de la différence de vitesse entre ces deux corps.

Ce troisième corps sépare partiellement ou entièrement les premiers corps. L'origine de ce milieu interfacial peut être externe (lubrifiant solide ou liquide) ou interne par formation in situ (détachement de particules des premiers corps). [7]

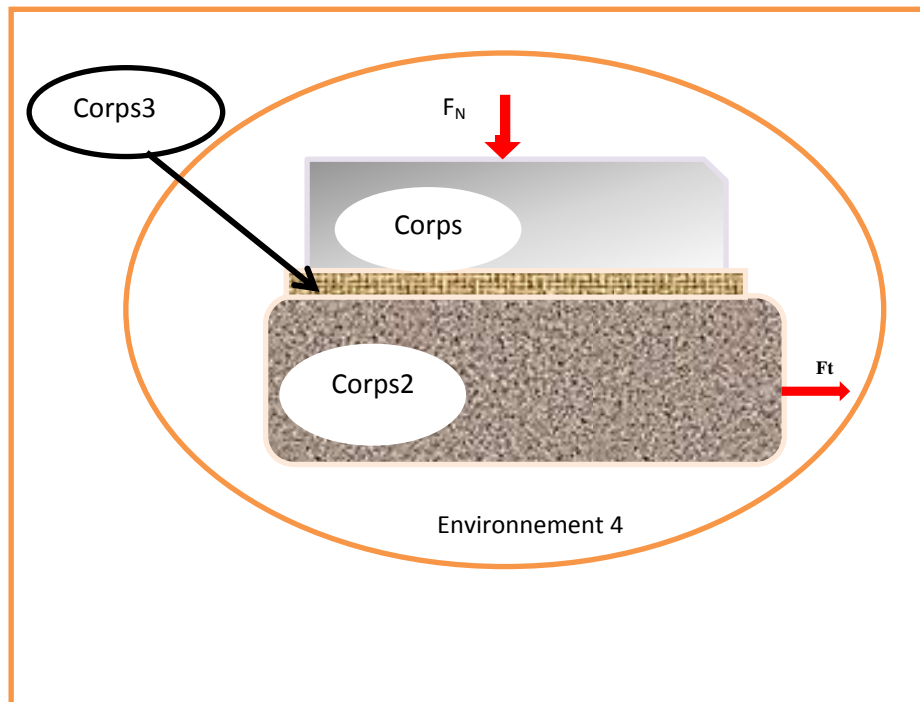


Figure II.1: Représentation schématique d'un tribosystème.

II.5. type de contact [8]

Dans cette section, on considère le contact statique de deux corps chargés par une force normale unique.

Les buts de ces études sont les suivants: il s'agit de calculer :

- L'aire de contact entre deux solides.
- La pression de contact entre les solides.

La distribution des contraintes à l'intérieur des solides, en utilisant les lois de la mécanique des milieux continus.

Les types de contact entre les surfaces varient avec la géométrie des solides en contact.

- **Le contact ponctuel**

On trouve ce contact entre une sphère et une sphère ou entre une sphère et un plan.

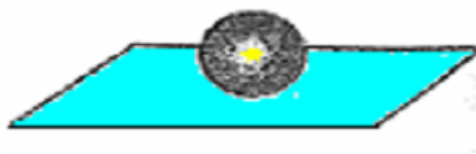


Figure II.2 : Le contact ponctuel.

- **Le contact linéaire**

On trouve ce contact entre un cylindre et un plan ou un cylindre et un autre cylindre, à titre d'exemple entre les dents d'engrenages.



Figure II.3 : Le contact linéaire.

- **Le contact surfacique**

On trouve ce contact entre un plan et un autre plan, par exemple dans cas du freinage on obtient un contact disque/plaquettes.

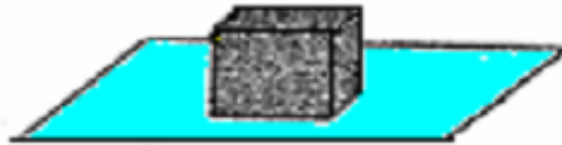


Figure. II.4 : Le contact surfacique.

II.6 .Concept du troisième corps

Avec l'approche de la tribologie des interfaces M. Godet et, Y. Berthier proposent le concept phénoménologique du troisième corps, élaboré suite à des observations expérimentales.

A partir des théories bien établies sur la lubrification l'introduction de cette notion de troisième corps contribue à la compréhension des phénomènes liées a la lubrification solide. Ce concept est fondé sur une approche globale du processus d'usure, avec la prise en compte de l'enchainement décrivant la vie du troisième corps dans le contact depuis la formation et le détachement des particules issues du premiers corps jusqu'à leur élimination définitive. [9]

II.7. Le triplet tribologique

Le triplet tribologique est constitué par un mécanisme, les deux premiers corps et troisième. Il permet de décrire les interactions entre les différents éléments qui entourent le contact, c'est-à-dire la 'boucle' (ou circuit) qui représente l'équilibre des forces extérieures au contact. Le mécanisme c'est l'ensemble du système mécanique qui impose les conditions de fonctionnement et via l'équilibre de forces internes (aspect mécanique) et l'environnement ambiant (aspect physicochimique). [10]

- **Le mécanisme**

C'est l'ensemble du mécanisme qui impose les conditions de fonctionnement et via l'équilibre des forces internes (aspect mécanique) et via l'environnement ambiant (aspect physicochimique). [10]

- **Les premiers corps**

Ce sont les matériaux qui bordent le contact. Ils interviennent par leur géométrie, leurs propriétés thermo élastiques, en introduisant des déformations qui à leur tour définissent la zone de contact élémentaire.

- **Troisième corps**

Il s'agit du volume de matière présent entre les 1^{er} corps. C'est un opérateur qui sépare les 1ers corps, transmet la charge entre eux tout en accommodant la majeure partie de leur différence de vitesse.

II.8. Les phénomènes de la tribologie

II.8.1. Le frottement

Il intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre produisant une force qui s'oppose au mouvement.

Le frottement peut être défini comme la force résistante tangentielle à l'interface commune entre deux corps, lorsque sous l'action d'une force externe un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à la surface de l'autre.

- **Coefficient de frottement**

La force de frottement F_T est proportionnelle à la charge normale F_N permettant de définir un coefficient de frottement :

$$\mu_f = F_T / F_N$$

Ce coefficient peut être statique ou dynamique :

$$\mu_s = F_s / F_N ; \mu_D = F_D / F_N$$

F_N : La force normale a l'interface des deux corps coulissants.[11]

F_D : La force requise pour maintenir le mouvement relatif entre deux corps.

F_S : La force suffisante pour empêcher le mouvement relatif entres deux corps.

- **Types de frottement**

La pratique du frottement et la théorie de la lubrification permettent de distinguer six régimes de frottement :

- Frottement d'adhérence.
- Frottement onctueux.
- Frottement sec.
- Frottement mixte.
- Frottement élastohydrodynamique.
- Frottement hydrodynamique.
- Frottement hydrostatique.

II.8.2.l'usure

Elle se traduit par une modification de la forme primitive et de la structure dans les couches extérieures des corps solides ainsi que par l'apparition de particules libres. [12]

L'usure est considérée comme un phénomène global très difficile a décrire du point de vue quantitatif.il en résulte que les différentes approches théoriques sont faites a partir d'hypothèses simplificatrices tendant à dissocier les processus mis en jeu pour mieux les appréhendés.

II.8.2.1. Phénomènes d'usure

La détérioration d'une matière est appeler usure, c'est la conséquence du frottement elle se produit au niveau de la zone de contact, les paramètres qui influent sur le taux d'usure sont:

- L'absence ou la présence d'un lubrifiant. [13]
- Les conditions opératoires: la charge, la température, la vitesse, la pression,...
- L'aire de contact.
- Les propriétés mécaniques des matériaux (dureté).
- La force de contact.

II.8.2.2. Les origines d'usure

- Les déformations plastiques.
- La fissuration.
- Les transformations physico-chimiques des surfaces.
- Adhésion : transfert à l'échelle atomique, grippage, micro grippage.

II.8.2.3. Différents types d'usure

Les mécanismes de dégradation des surfaces rencontrés sont nombreux. L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces

- Usure par érosion
- Usure par fatigue
- Usure par adhésion
- Usure par *abrasion*
- Usure par soudage
- Usure par corrosion et oxydation
- Usure par fretting [16]

II.8.3. Les lubrifiants

II.8.3.1. Définition

Le mot lubrifiant est tiré du mot latin « lubricus » signifiant glissant [15], c'est le produit interposé entre deux surfaces frottantes d'un mécanisme pour réduire le frottement, l'échauffement et l'usure des organes en mouvement.

On parle de lubrification dans le cas où le lubrifiant (mécanique) est liquide et de graissage dans le cas où il est compact.

- En mécanique, on lubrifie les pièces métalliques ou en céramiques avec un corps gras, comme de l'huile ou de la graisse.
- En biologie, la lubrification intervient sous forme de mucus à base d'eau, produit par les muqueuses qui recouvrent la face interne des organes qui débouchent vers l'intérieur ; Elle intervient également dans le fonctionnement des articulations qui comptent parmi les meilleurs mécanismes glissants que l'on ait connus (Lubrifiant anatomique).

II.8.3.2. Fonctions d'un lubrifiant [16]

En plus de favoriser le mouvement de glissement entre deux surfaces frottantes, le lubrifiant permet aussi de :

- Diminuer les frottements et les résistances passives dans les machines, améliorer leur rendement et économiser l'énergie.
- Protéger les organes lubrifiés contre les diverses formes de corrosion et d'usure, donc contribuer à leur longévité.
- Evacuer la chaleur produite dans les moteurs ou lors de l'usinage, favoriser l'équilibre thermique des machines.
- Améliorer l'étanchéité vis-à-vis des gaz, des liquides ou des poussières.
- Eliminer les impuretés et les débris d'usure.
- Transmettre de l'énergie ou de la chaleur.
- Assurer l'isolation électrique.
- Améliorer l'état de surface des pièces usinées.
- Neutraliser et protéger les surfaces métalliques des produits de combustion acides dans les moteurs.

II.8.3.3. Types de lubrifiants

a) Lubrifiants solides

Les lubrifiants solides sont utilisés pour solutionner les problèmes de frottement et d'usure dans des conditions variées telles que :

- Des températures extrêmes allant de -250 à +1000°C.
- Les radiations à haute énergie de l'espace ou des réacteurs nucléaires.
- Des milieux corrosifs, acides ou chimiquement agressifs tels que l'oxygène liquide, dissolvants, l'essence.
- Des charges très élevées, des mouvements oscillants ou des vitesses très faibles.
- Des mécanismes délicats, des contacts électriques ou des environnements qui ne tolèrent pas la contamination possible d'un lubrifiant liquide.

Les lubrifiants solides n'évacuent pas la chaleur, ni les débris d'usure du contact ; ils ne se renouvellent pas et le frottement reste quand même relativement élevé.

Dans le choix d'un lubrifiant solide, l'ingénieur doit considérer comme première propriété une faible résistance à la déformation plastique. A cette fin, ces lubrifiants doivent pouvoir se distribuer facilement sur la surface et bien y adhérer.

Lors du choix, il faut aussi considérer la compatibilité avec l'environnement auquel il est destiné, la ductilité et la conductivité électrique entre autres.

b) Lubrifiants liquides

La solution ultime au frottement et à l'usure est le lubrifiant liquide. En ingénierie, les lubrifiants liquides se nomment huiles. En quantité et qualité adéquates et en présence d'une géométrie appropriée des surfaces en contact, l'huile forme un film entre les surfaces en mouvement relatif d'une épaisseur h égale 2 à 100 fois la hauteur des aspérités.

L'usure est ainsi complètement éliminée et la résistance devient celle du film. La formation d'un film épais est régie par trois classes de paramètres : les paramètres opérationnels tels que la charge, et la vitesse, les paramètres géométriques du contact et la viscosité dynamique de l'huile.

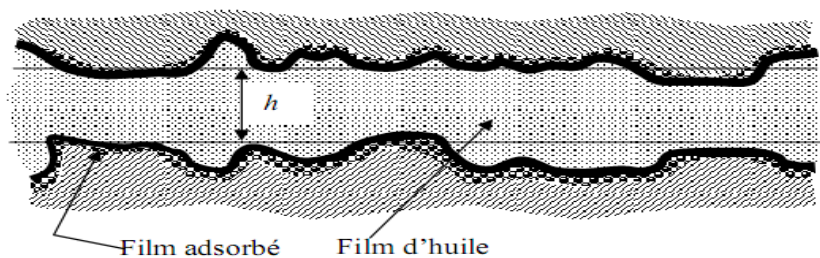


Figure II.5 : Deux solides séparés par un film épais de lubrifiant liquide.

c) Lubrifiants plastiques

Les lubrifiants plastiques occupent une place intermédiaire entre les lubrifiants solides et liquides, la rugosité est plus faible et dans des conditions meilleures le coefficient de frottement est de l'ordre de 0,03-0,12. [17].

d) Lubrifiants gazeux

Dans certains mécanismes on trouve des surfaces mobiles totalement séparées par un flux de gaz maintenu sous pression ; le plus souvent, pour des raisons évidentes de disponibilité et de coût, on utilise de l'air et ses composants. Il ne s'agit pas là d'une lubrification au sens

propre du terme, mais d'une disposition constructive qui permet d'utiliser à bon escient les propriétés physiques des écoulements gazeux.

Le gaz peut être utilisé sous faible pression, il se comporte alors comme un fluide à peu près incompressible, et l'on obtient alors des déplacements sur coussins d'air.

Dans d'autres applications, le gaz est soumis à des pressions beaucoup plus importantes et il se comporte alors comme un fluide compressible ; ce mode de fonctionnement est celui des guidages aérostatiques qui permettent d'obtenir des vitesses très élevées sans aucun contact matériel.

Exemple

Le guidage des fraises des dentistes, l'air comprimé étant à la fois la source d'énergie, puisqu'il fait tourner une petite turbine, et l'élément de sustentation du rotor mobile, lequel atteint couramment 150 à 200 000 tours/min.

II.8.3.4. Les additifs

Les additifs sont incorporés aux huiles de base ou aux graisses, dans le but d'améliorer certains de leurs propriétés ou de leur apporter de nouvelles.

Il existe des additifs ne possédant qu'une seule fonction tandis que d'autres à structures souvent plus complexes, sont multifonctionnelles.

Pour ces différents additifs, il y a ceux qui agissent sur le lubrifiant, ceux qui agissent sur les surfaces de contact et ceux qui agissent sur les deux en même temps.

Selon leur mode d'action, les principaux additifs sont :

Additifs	Propriétés
Anti usure	Réduit l'usure et la friction
Détergent	Garde les surfaces libres de dépôts
Dispersant	Garde les dépôts en suspension
Inhibiteur de corrosion	Prévient la rouille
Antioxydant	Retarde l'oxydation de l'huile
Agent extrême-pression	Empêche le rayage et le grippage
Anti mousse	Retarde le moussage
Modificateur de friction	Modifie les propriétés de friction
Abaisseur de l'écoulement	Permet à l'huile de s'écouler par temps froid
Agent de gonflement de joints	Fait en sorte que les joints d'étanchéité ne fuient pas
Désactivateur de métal	Retarde l'oxydation des huiles catalytiques
Agent épaississant	Augmente la viscosité
Réducteur de frottement	Diminue les frottements
Agent émulsifiant	Stabilise les émulsions de l'huile dans l'eau

Tableau II.1 : les principaux additifs et leurs propriétés.

II.8.3.5.Principales caractéristiques des lubrifiants

- **La viscosité**

C'est une des propriétés capitale des huiles de graissage, qui conditionne leur emploi dans la majorité des cas.

Plus grand est la viscosité d'un liquide, plus grand est la durée de son écoulement, la notion de viscosité implique donc celle du mouvement, on peut dire que la viscosité est la résistance qu'oppose un fluide au glissement de ses molécules les unes sur les autres.



Figure II.6 : *Ecoulement de quelques substances de différentes viscosités.*

L'inverse de la viscosité est la fluidité, le modèle Newtonien suppose qu'il existe une relation de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement $\tau(y)$ et le gradient de vitesse $(\frac{dV(y)}{dy})$ comme suit :

$$\tau(y) = \mu \frac{dV(y)}{dy} \quad (\text{II.1})$$

μ : est le coefficient de viscosité dynamique qui caractérise donc la résistance au glissement fluide sur fluide.

La viscosité dynamique, exprimée en poise (P) dans le système CGS, et le pascal seconde (Pa.s) dans le système MKSA, pendant longtemps l'unité MKSA a été appelée le Poiseuille et notée PI.

$$1\text{Pa} = 1\text{PI} = 10\text{P}$$

On utilise également la viscosité cinématique ν qui est le quotient de la viscosité dynamique par la masse volumique :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{II.2})$$

Unité de mesure de ν est le cm^2/s encore appelée stokes (st) ou encore le centistokes (cSt) dans le système CGS, le m^2/s dans le système MKSA.

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} = 10^6 \text{ cSt.}$$

- **L'onctuosité**

Elle exprime la possibilité, pour un lubrifiant, d'adhérer aux surfaces frottantes et de former une couche permanente entre ces surfaces.

Donc c'est la résistance qu'oppose le lubrifiant à son arrachement de la surface frottante sur laquelle il est établi.

L'onctuosité varie dans le même sens que la viscosité.

- **L'oxydabilité**

Elle caractérise la résistance d'une huile à une éventuelle oxydation. Une huile qui s'oxyde se détériore.

- **La corrosivité**

Certaines huiles contiennent des additifs ou minéraux qui ont un caractère acide, pouvant attaquer les surfaces des pièces par le phénomène de corrosion. Donc la corrosivité est la détérioration des pièces par les acides.

- **L'inflammabilité**

Elle est mesurée par le point d'éclair qui est la température pour laquelle les vapeurs émises s'enflamment au contact d'une flamme.

- **La résistance au froid**

Une huile figée ou gelée peut empêcher toute lubrification.

- **La densité**

Elle se mesure à 15°C par rapport à l'eau à 4°C, à l'aide d'un densimètre plongeant dans un tube à essais. Les valeurs courants pour les huiles de pétrole s'étalent entre 0,85 et 0,95 et dépendent de l'origine des produits.

La densité diminue avec la température. Certains lubrifiants synthétiques ont des densités bien plus élevées, jusqu'à 1,5.

La comparaison de la densité d'une huile usagée avec celle de l'huile neuve permet de détecter d'éventuelles pollutions.

- **La couleur**

Les huiles de pétrole, elle varie généralement du blanc pur au rouge foncé en passant par le jaune citron et le jaune orange, on l'évalue par comparaison avec des verres étalons numérotés en colorations.

La couleur foncée d'un lubrifiant usagé peut être un assez bon moyen d'apprécier son altération, de même qu'un aspect laiteux peut indiquer la présence d'eau. La présence d'additifs oblige la prudence et cette propriété a beaucoup perdu de son intérêt aujourd'hui.

- **La tension superficielle**

Cette tension est due aux forces d'attraction intermoléculaire et se manifeste en particulier au contact d'une paroi solide.

- **La compressibilité**

Les huiles sont d'autant moins compressibles que la pression est plus forte, la viscosité plus faible et la température plus basse.

- **La résistivité électrique**

On peut admettre pour les huiles minérales une valeur d'ordre de 10⁹ ohms.cm.

- **La température d'auto inflammation**

C'est la température à laquelle se produit une oxydation spontanée dans l'air (environ 400°C), elle est nettement supérieure à celle du point d'éclair.

II.8.3.6 Les huiles de coupe

Dans l'industrie mécanique et métallurgique, l'usinage des métaux est réalisé sur des machines-outils. Ce type d'opérations, qui mettent en contact de manière dynamique une pièce métallique et un outil conduit à d'importants phénomènes de frottement qui se traduisent par une élévation de la température et une usure de l'outil de coupe.

Afin de limiter ces phénomènes, les industries de transformation des métaux ont recours aux fluides de coupe, pour remplir plusieurs fonctions : [18, 19]

- Refroidir l'outil de coupe et la pièce usinée pour éviter leurs déformations.
- Lubrifier l'interface copeau-outil afin de réduire les frottements, ce qui diminue ainsi la puissance consommée.
- Eliminer les copeaux et les imputées pour limiter les risques de détérioration de la surface usinée des pièces.
- Protéger de la corrosion, les pièces usinées et l'outil de coupe.

La diversité des opérations d'usinage et la grande variété des métaux usinés nécessitent une gamme très large de fluides de coupe.

De ce fait on distingue deux catégories principales de fluides de coupe : [20]

- **Les fluides de coupe entiers**

Les produits anhydres, généralement sans eau, sont employés lorsque la propriété majeure recherchée est la lubrification.

- **Les fluides de coupe aqueux**

Les produits sont livrés concentrés, ils sont utilisés à de faibles concentrations dans l'eau.

a) Classification des fluides de coupe aqueux

Les fluides de coupe aqueux sont obtenus après dispersion dans l'eau de produits concentrés de formulation complexes (huiles minérales, agents émulsifiants, inhibiteurs de corrosion, additifs divers).

Ces produits émulsifiables en toutes proportions avec l'eau, sont couramment utilisés à des concentrations variant de 1 à 10% pour 90 à 99% d'eau. [21]

Selon la nature et la proportion relative des produits concentrés de départ, on distingue trois types de fluides de coupe aqueux. [22 ,23]

- **Les hydrosolubles**

Le concentré, à base d'huile minérale émulsionnée dans l'eau, conduit à une émulsion d'aspect blanc laiteux.

L'eau améliore les possibilités de refroidissement du fluide de coupe, tandis que l'huile fournit la lubrification.

- **Les fluides semi-synthétiques**

Le concentré contient peu d'huile minérale qui est micro-émulsionnée dans l'eau et une forte proportion d'agents émulsifiants et d'agents anticorrosion.

Leurs aspects peuvent être laiteux bleuté ou translucide.

- **Les fluides synthétiques**

Le concentré ne contient pas d'huile minérale, c'est un mélange complexe d'inhibiteurs de corrosion, d'agents mouillants et d'additifs divers.

L'aspect de ce type de fluide de coupe est transparent.

b) Formulation générale

Le concentré d'un fluide de coupe aqueux a une formulation très complexe comportant une dizaine de produits, chacun à un rôle bien précis [21] :

- **Huile de base**

Généralement, les huiles minérales utilisées sont de type paraffiniques, naphthéniques ou aromatiques. Ces huiles jouent le rôle de lubrifiant.

- **Agents émulsifiants**

Les agents émulsifiants qui sont les tensioactifs et les cotensioactifs, engendrent la stabilité des macroémulsions et des microémulsions en diminuant la tension interfaciale entre la phase aqueuse et la phase huileuse.

Les tensioactifs utilisés sont de type anionique, les cotensioactifs sont principalement de type alcool particulièrement soluble dans l'eau.

- **Inhibiteurs de corrosion**

Ces composés limitent les phénomènes de corrosion lors de l'usinage.

Il s'agit essentiellement de produits de type amines grasses, amides gras et de carbonate de sodium.

- **Les agents antimousses**

Afin de limiter la formation de la mousse au cours de l'usinage, des composés antimousse comme les cires microcristallines, des émulsions de silicones ou de savons d'aluminium sont utilisés dans les fluides de coupe.

- **Les agents biocides**

Les biocides (isothiazoline, dérivés d'hexhydrotriazine...) sont incorporés dans la formation pour éviter la contamination et la dégradation des fluides de coupe par les bactéries et les champignons.

II.9.Conclusion

Pour éviter l'usure des machines et diminuer les coûts de la maintenance il faut éviter le contact direct (métal sur métal) et favoriser le glissement, ainsi il est nécessaire de refroidir et de dégager la chaleur.

On peut dire qu'à chaque sorte de contact mécanique correspond une composition de lubrifiant optimale (ou moins mauvaise que les autres ...) et une façon de la mettre en œuvre.

Alors pour maintenir votre matériel (machine, moteur d'auto...) en bon état il faut changer de lubrifiant à chaque fois que le lubrifiant a perdu ses caractéristiques.

III.1.Introduction

Le lubrifiant joue un rôle très important lors des opérations d'usinages des matériaux, il permet de diminuer les frottements et de refroidir les surfaces de contacts outil-pièce.

L'étude que nous avons menée a pour objectif de comprendre l'évolution des caractéristiques rhéologiques intrinsèques des huiles de coupe en présence d'eau.

III.2.Matériau et matériel utilisés

III.2.1.Matériau

Le matériau utilisé est une huile de coupe utilisée pour la lubrification du contacte outil /pièce lors de l'usinage des pièces mécaniques, elle est issue du Hall de technologie de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Nous avons testés 13 échantillons avec des pourcentages d'eau différents, et a différentes températures : $T=25^{\circ}\text{C}$, $T=40^{\circ}\text{C}$, $T=60^{\circ}\text{C}$, $T=80^{\circ}\text{C}$.

Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
% huile	100	99	97	95	90	80	60	50	40	20	15	10	5
% eau	0	1	3	5	10	20	40	50	60	80	85	90	95

Tableau III.1 : les différents échantillons utilisés.

III.2.2.Matériel

Pour pouvoir caractérisé le comportement rhéologique de ces échantillons, nous avons utilisé un rhéomètre a contrainte imposé de type RHEOStress01 disponible au niveau du laboratoire La MoMS.

Nous avons travaillé avec une géométrie plan-plan, qui permet une application uniforme du cisaillement sur le film d'huile.

Le diamètre du plan de cette géométrie est de 20 mm, l'entrefer est de 0.7 mm.

Le RHEOStress01 est un rhéomètre universel de laboratoire avec les dispositifs d'un instrument de catégorie de recherche, ces excellentes possibilités sont réalisées par l'utilisation d'une technologie du processeur de galet pneumatique de la 4eme génération et de signal numérique (DSP), doté d'un système de mesure piloté par un ordinateur pour de meilleures performances d'analyse des courbes, de détermination de comportement rhéologiques des échantillons avec le logiciel HAAKEReowin.



Figure III.1: Rhéomètre RHEOStress01.

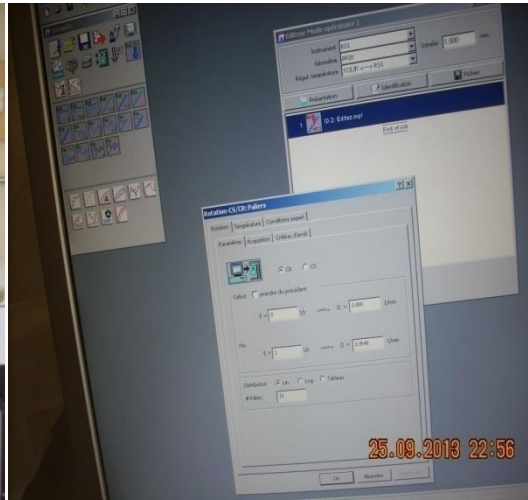


Figure III.2 : Logiciel HAAKEReowin.

- **Caractéristiques du RHEOStress01**

Société de fabrication : Thermo HAAKE.

Régulation de température : TCE/P RS1 (TCE/P (Electrical/Plate)).

Inertie : $9.9501e - 06 \text{ kgm}^2$.

Numéro de série : 1200403735004.

Coefficient de dilatation thermique : $1.100 \mu\text{m/k}$.

Entrefer : 0.700 mm .

Géométrie : PP20.

III.3.Procédure expérimentale

La fonction d'un lubrifiant est de diminuer le frottement et de refroidir le contact outil/pièce, par conséquent il est constitué d'huile (diminuer les frottements), plus de l'eau (refroidir le contact outil/pièce).

Les expériences que nous avons menées consistent à l'étude de l'influence de la température et de l'ajout de l'eau sur le comportement rhéologique de ces lubrifiants :

- Pour l'étude de l'influence de la température, nous avons effectué des tests à plusieurs températures (25°C, 40°C, 60°C, 80°C).
- Pour l'étude de l'influence de l'eau nous avons effectué plusieurs tests, en faisant varier le pourcentage d'eau de 0% à 95%.

Ces essais ont été réalisés à taux de déformation imposée, et toutes les mesures ont été prises dans la période d'équilibre.

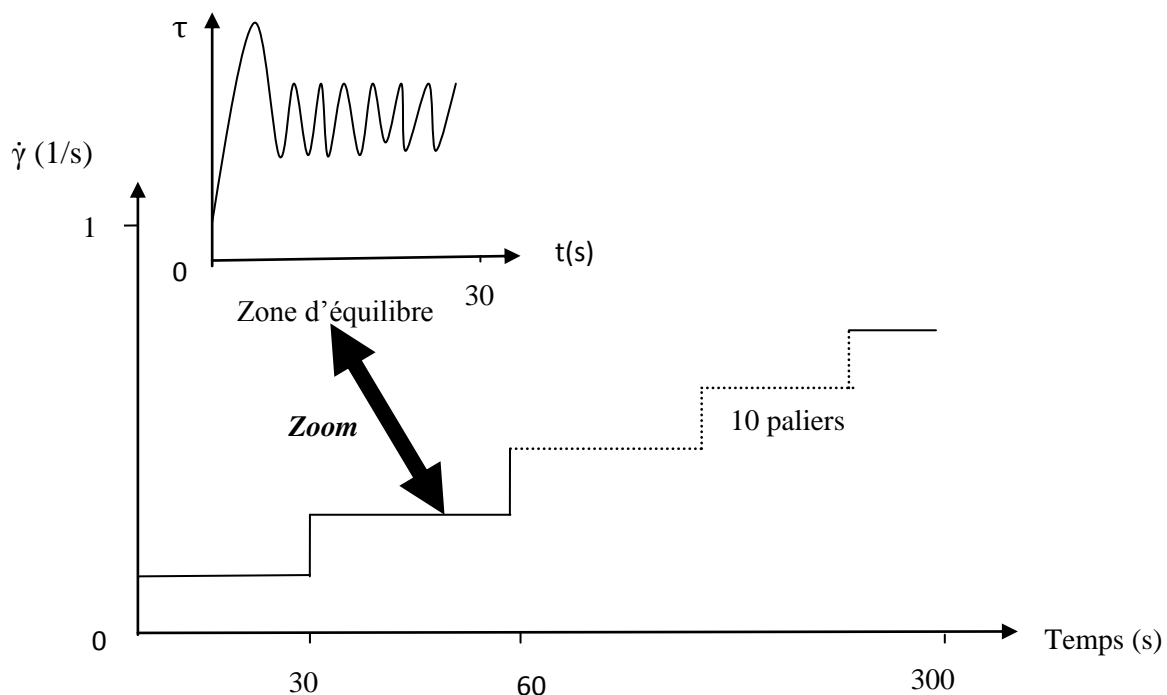


Figure III.3: Protocole d'essai.

On fait varier le taux de déformation de 0 à 1 (1/s) en 10 paliers, chaque palier dure de 30 s. la durée totale de l'essai est de 300 s.

III.4.Résultats et interprétations

III.4.1Influence du pourcentage de l'eau

- Rhéogrammes

Les figures de 4 à 55 représentées ci-après, illustrent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement dans les différents échantillons pour les températures $T=25^{\circ}\text{C}$, $T=40^{\circ}\text{C}$, $T=60^{\circ}\text{C}$, $T=80^{\circ}\text{C}$.

Nous avons approximé ces points expérimentaux par l'équation $y= a +b x^n$, cette équation épouse bien les point expérimentaux obtenus ($R^2 = 0.95$ a 0.99).

- Pour la température $T=25^{\circ}\text{C}$

Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour différents pourcentages d'eau a une température $T= 25^{\circ}\text{C}$.

1. Huile 0% d'eau

$$\tau = 3.5 + 8.95 \dot{\gamma}^{0.28}$$

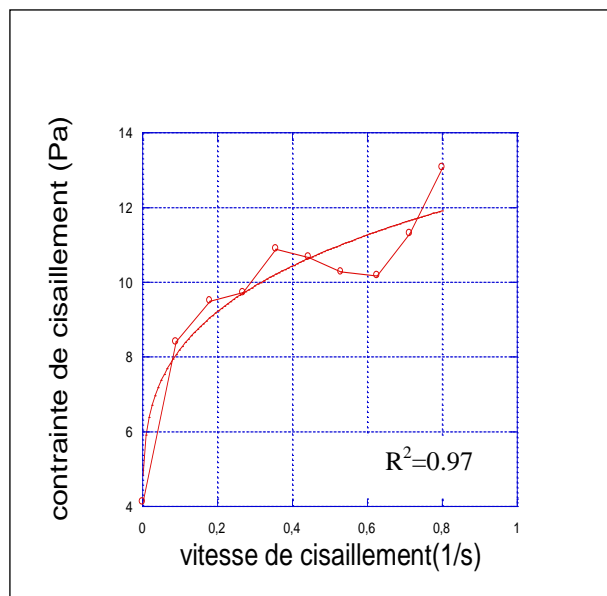


Figure III.4 : Variation de la contraint de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0% d'eau.

2. Huile 1% d'eau

$$\tau = 1.41 + 4.15 \dot{\gamma}^{0.64}$$

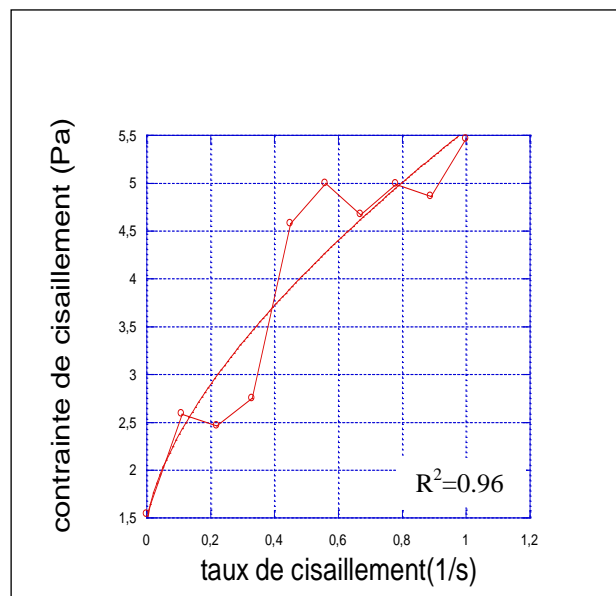


Figure III.5 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse dcisaillement pour 1%d'eau.

3. Huile 3% d'eau

$$\tau = 1.89 + 8.14 \dot{\gamma}^{0.62}$$

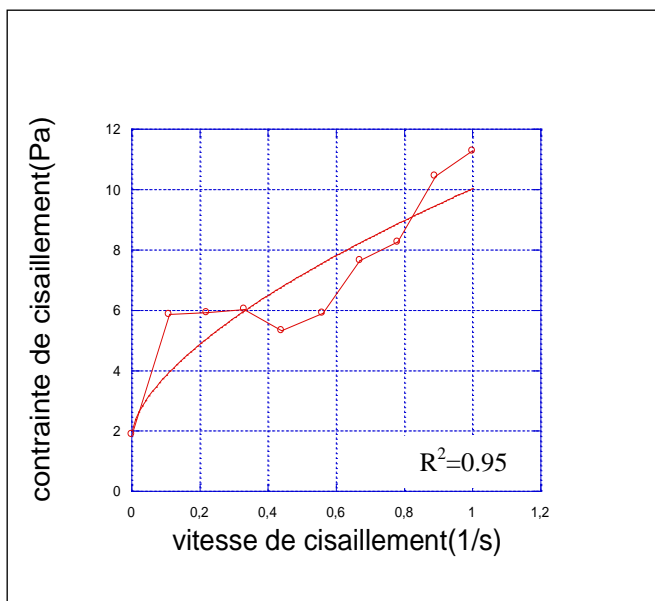


Figure III.6 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3% d'eau.

4. Huile 5% d'eau

$$\tau = 0.33 + 3.47 \dot{\gamma}^{0.23}$$

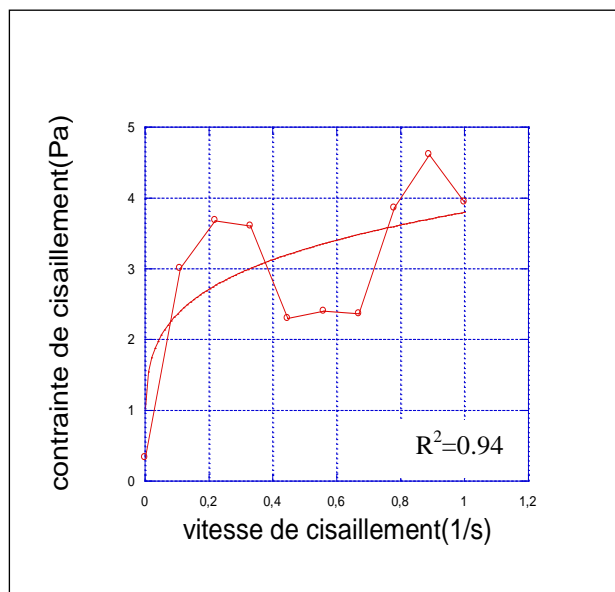


Figure III.7 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5% d'eau.

5. Huile 10% d'eau

$$\tau = 7.45 + 61.74 \dot{\gamma}^{0.43}$$

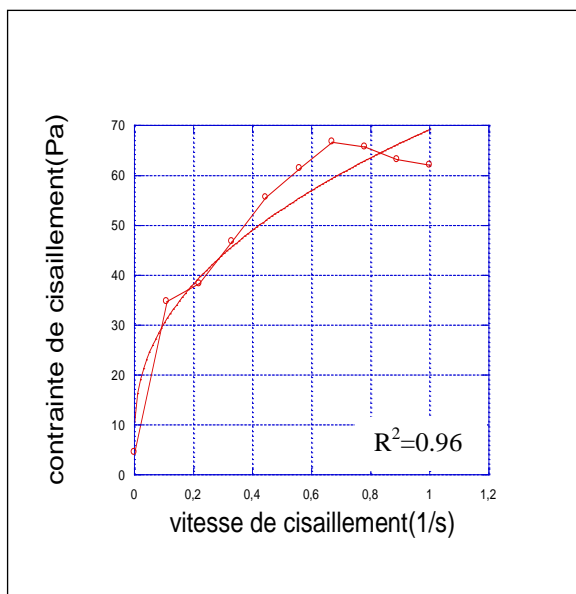


Figure III.8 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10% d'eau.

6. Huile 20% d'eau

$$\tau = 31.65 + 226.29 \dot{\gamma}^{0.1}$$

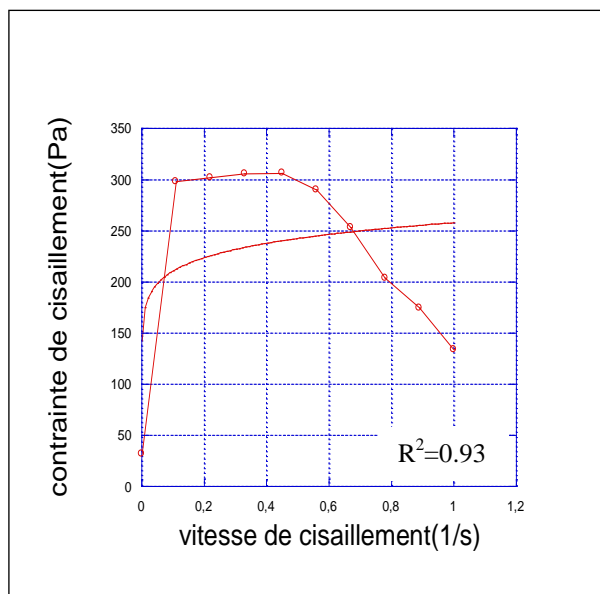


Figure III.9 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20% d'eau.

7. Huile 40% d'eau

$$\tau = 1.42 + 9.07 \dot{\gamma}^{0.16}$$

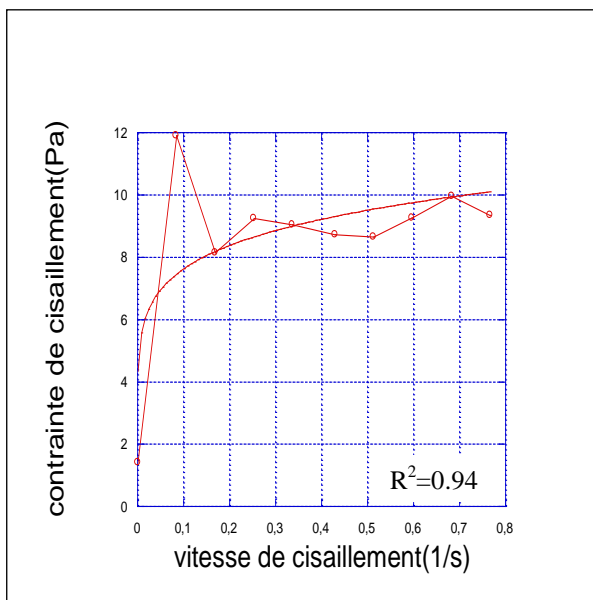


Figure III.10 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40% d'eau.

8. Huile 50% d'eau

$$\tau = 5.95 + 18.55 \dot{\gamma}^{0.26}$$

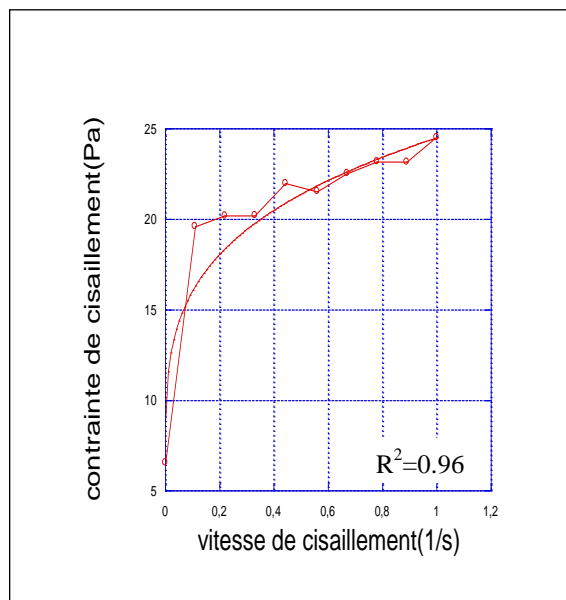


Figure III.11 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de vitesse de cisaillement pour 50% d'eau.

9. Huile 60% d'eau

$$\tau = 1.87 + 6.39 \dot{\gamma}^{0.12}$$

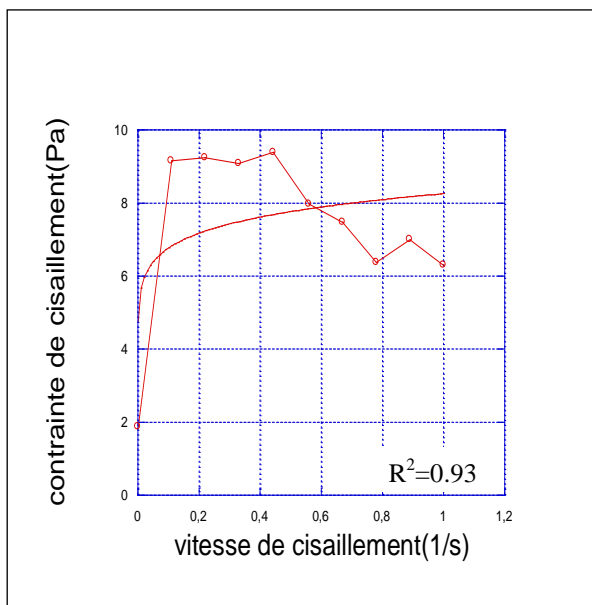


Figure III.12 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de vitesse de cisaillement pour 60% d'eau.

10. Huile 80% d'eau

$$\tau = 2.32 + 11.15 \dot{\gamma}^{0.5}$$

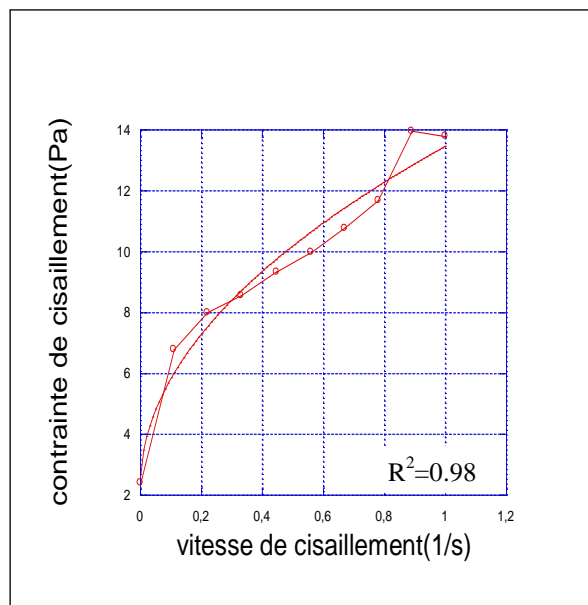


Figure III.13 : Variation de la contrainte du cisaillement en fonction de vitesse de cisaillement pour 80% d'eau.

11. Huile 85% d'eau

$$\tau = 6 + 9.09 \dot{\gamma}^{0.27}$$

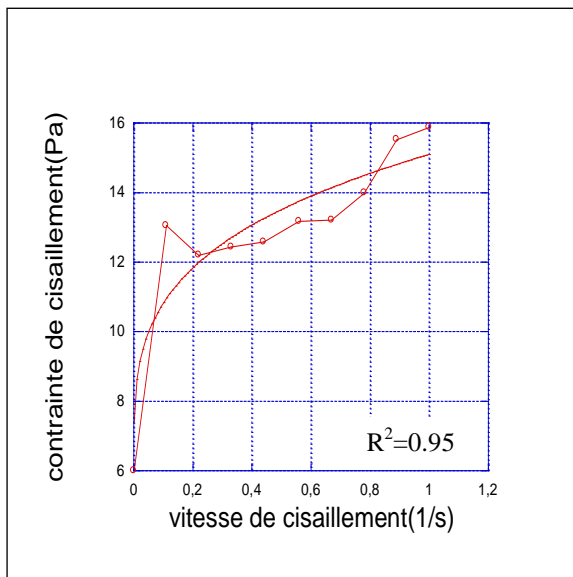


Figure III.14 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de vitesse de cisaillement pour 85% d'eau.

12. Huile 90% d'eau

$$\tau = 3.09 + 7.24 \dot{\gamma}^{0.22}$$

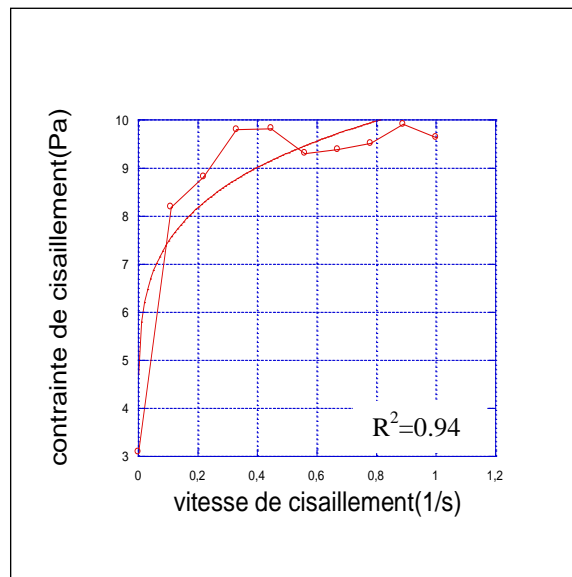


Figure III.15 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de vitesse de cisaillement pour 90% d'eau.

13. Huile 95% d'eau

$$\tau = 1.46 + 11.29 \dot{\gamma}^{0.22}$$

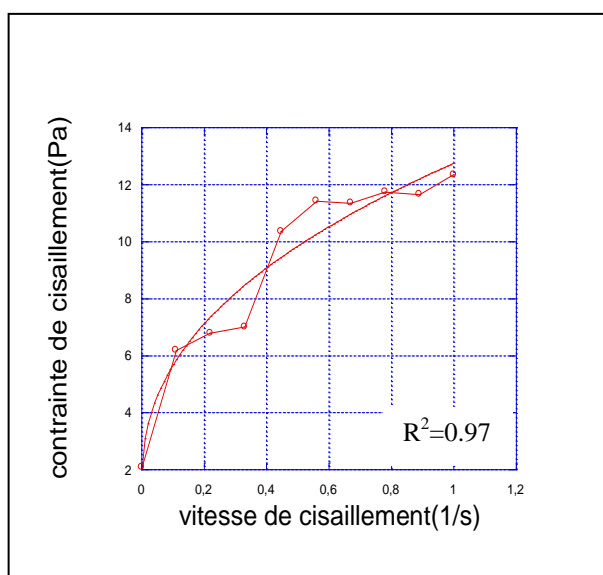


Figure III.16 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de vitesse de cisaillement pour 95% d'eau.

Pour une température T=40°C

Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour différents pourcentages d'eau a une température T= 40°C.

1. Huile 0 %d'eau

$$\tau = 1 + 9.97 \dot{\gamma}^{0.17}$$

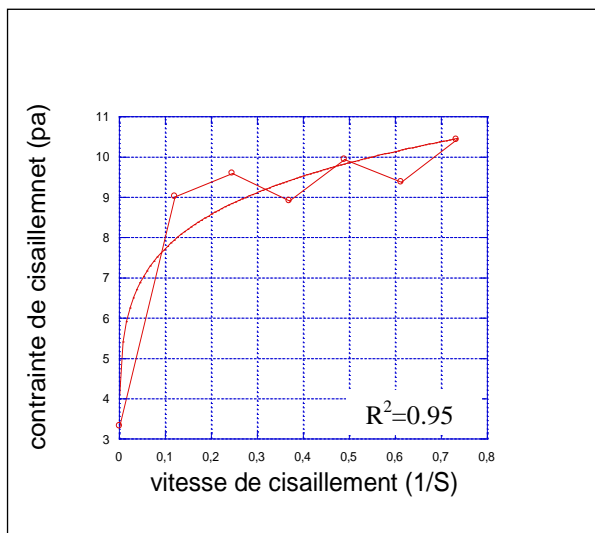


Figure III.17 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0 % d'eau.

2. Huile 1% d'eau

$$\tau = 1.58 + 12.67 \dot{\gamma}^{0.39}$$

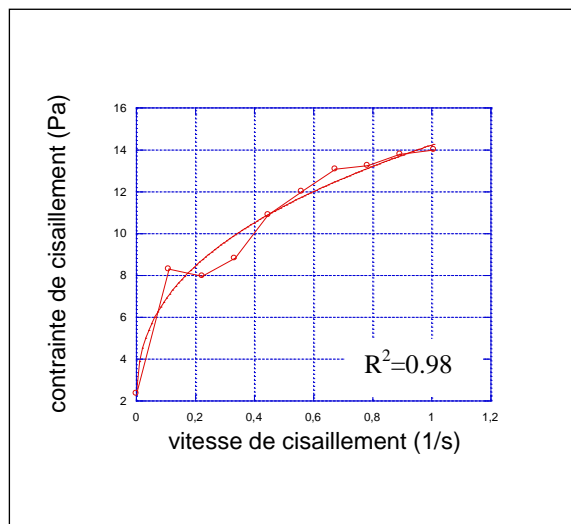


Figure III.18 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 1 % d'eau.

3. Huile 3% d'eau

$$\tau = 4.83 + 17.29 \dot{\gamma}^{0.28}$$

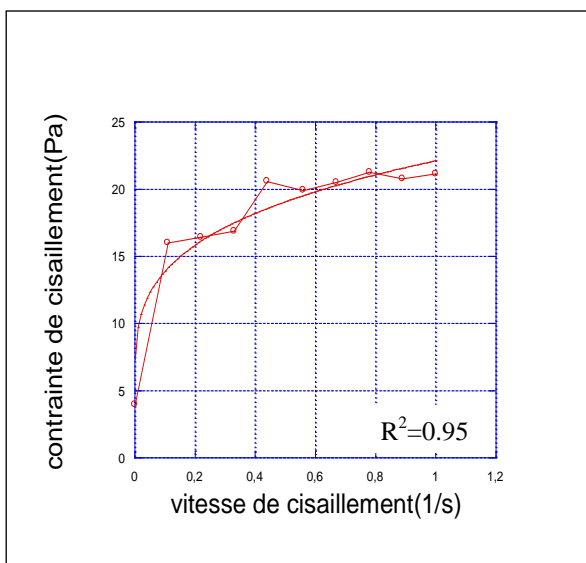


Figure III.19 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3 % d'eau.

4. Huile 5% d'eau

$$\tau = 1.06 + 11.54 \dot{\gamma}^{0.21}$$

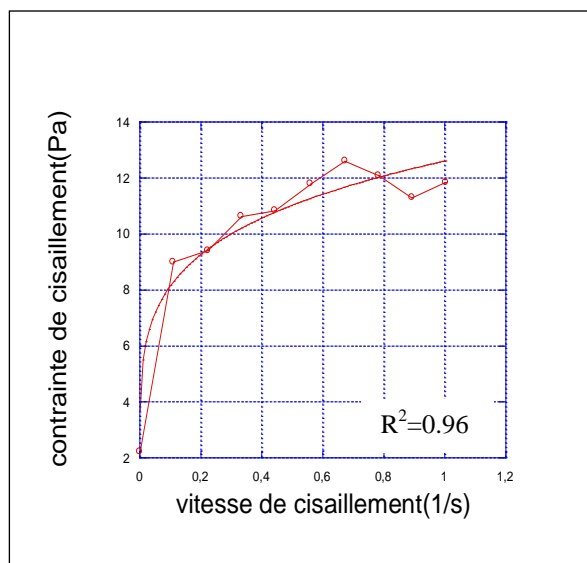


Figure III.20: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5 % d'eau.

5. Huile 10% d'eau

$$\tau = 3.5 + 35.39 \dot{\gamma}^{0.19}$$

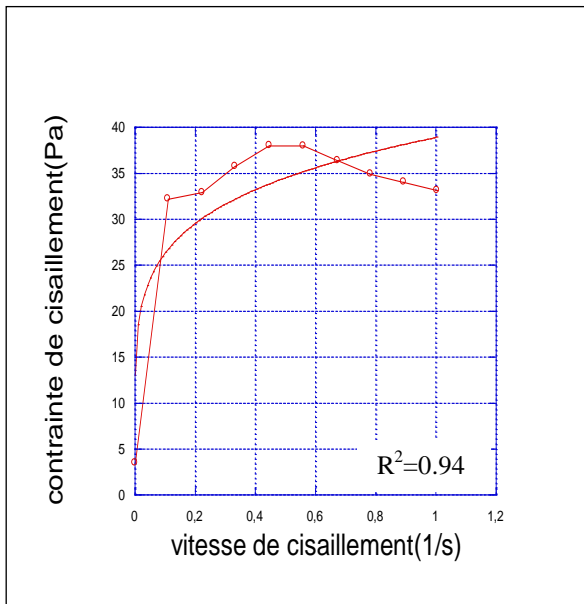


Figure III.21 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10% d'eau.

6. Huile 20% d'eau

$$\tau = 23.85 + 294.48 \dot{\gamma}^{0.23}$$

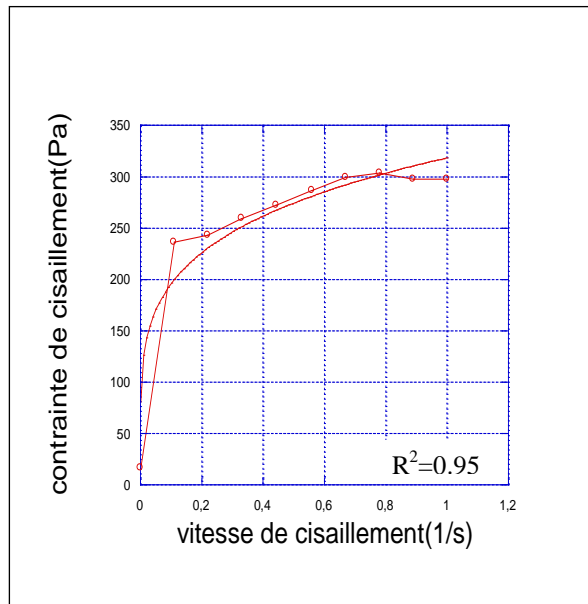


Figure III.22 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20 % d'eau.

7. Huile 40% d'eau

$$\tau = 2.4 + 8.99 \dot{\gamma}^{0.15}$$

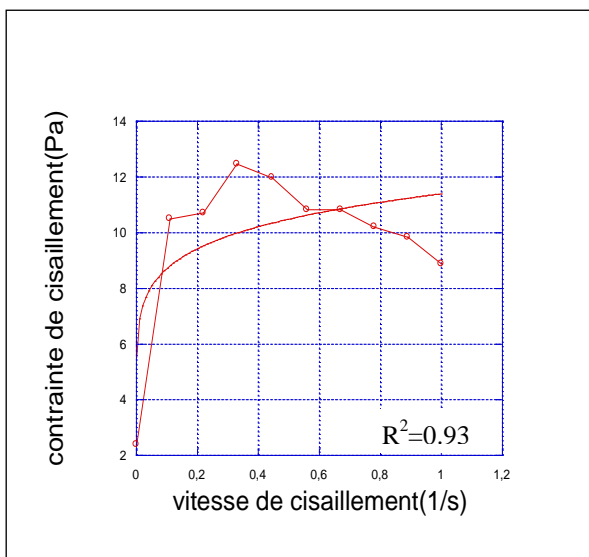


Figure III.23 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40% d'eau.

8. Huile 50% d'eau

$$\tau = 9.4 + 22.97 \dot{\gamma}^{0.22}$$

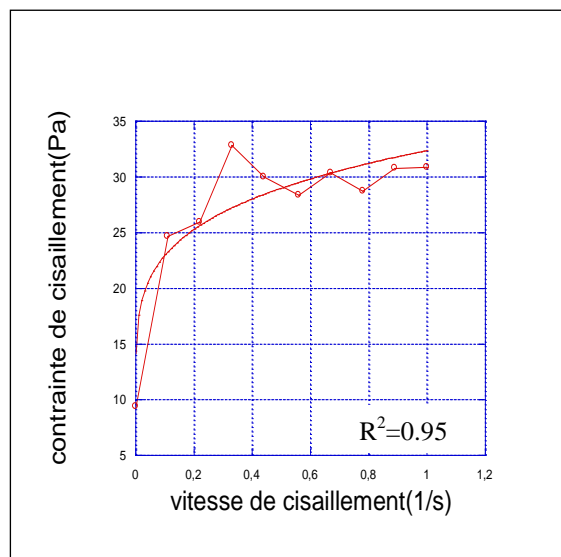


Figure III.24: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 50% d'eau.

9. Huile 60% d'eau

$$\tau = 1.13 + 2.53 \dot{\gamma}^{0.29}$$

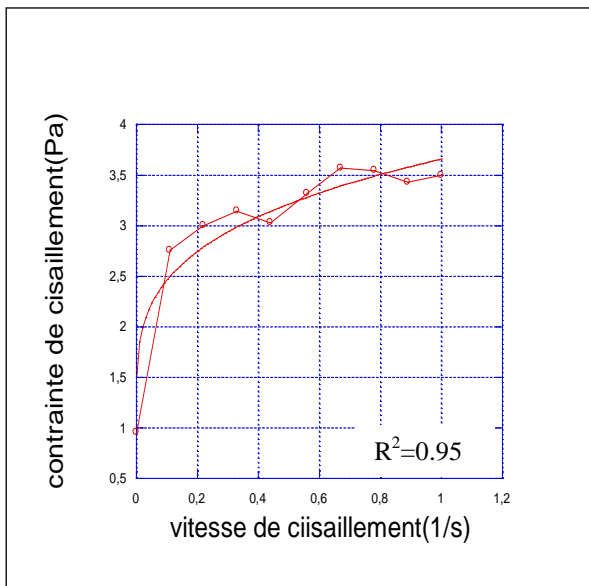


Figure III.25: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 60% d'eau.

10. Huile 80% d'eau

$$\tau = 4.2 + 15.7 \dot{\gamma}^{0.25}$$

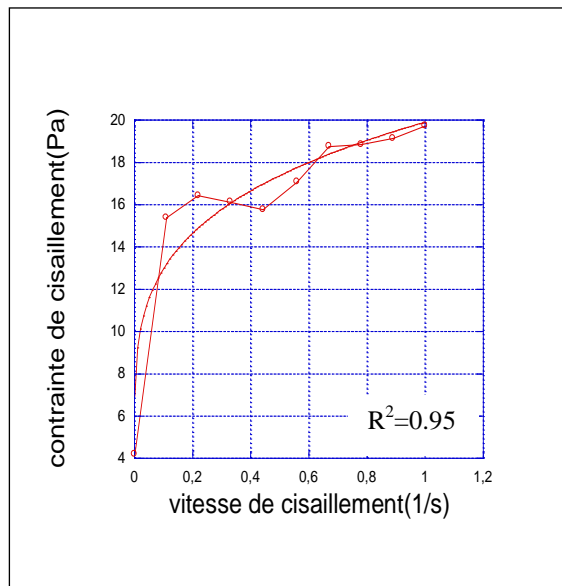


Figure III.26: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80% d'eau.

11. Huile 85% d'eau

$$\tau = 4.5 + 20.31 \dot{\gamma}^{0.19}$$

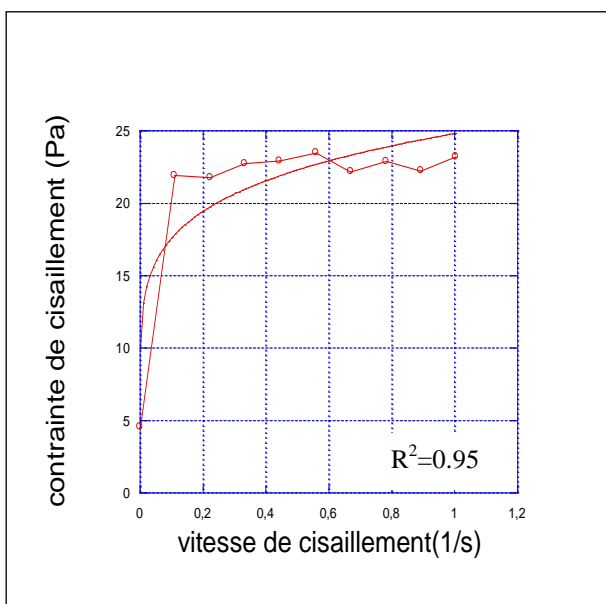


Figure III.27: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 85% d'eau.

12. Huile 90% d'eau

$$\tau = 4.32 + 17.83 \dot{\gamma}^{0.22}$$

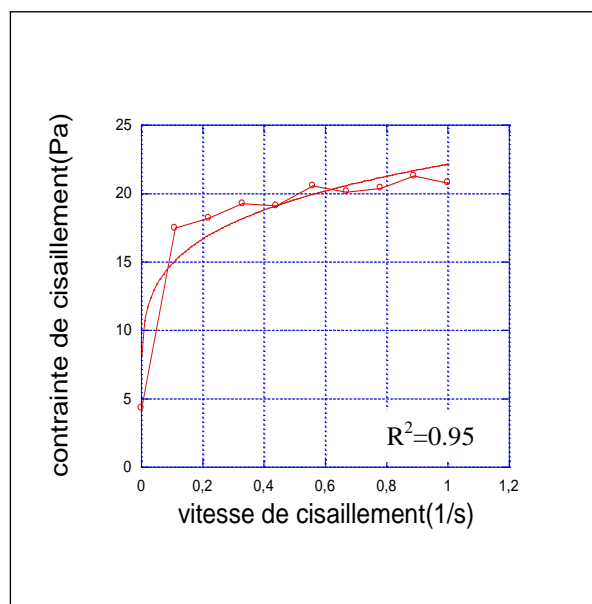


Figure III.28: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 90% d'eau.

13. Huile 95% d'eau

$$\tau = 5.4 + 10.79 \dot{\gamma}^{0.26}$$

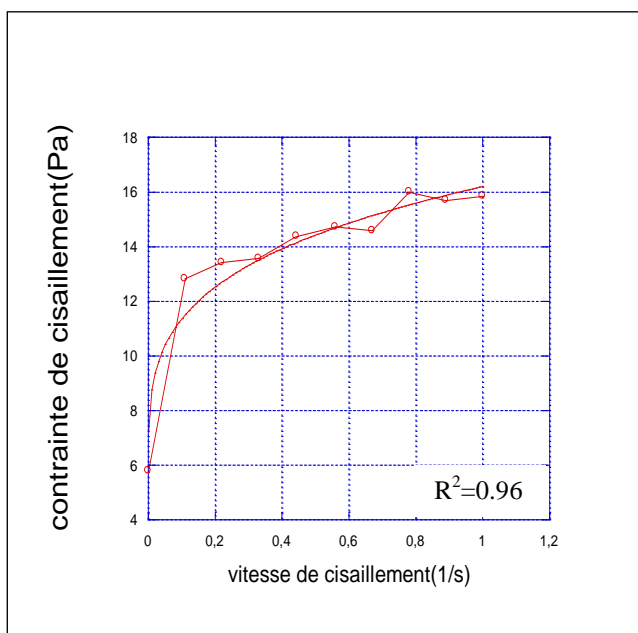


Figure III.29: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse du cisaillement pour 95% d'eau.

- **Pour une température T=60°C**

Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour différents pourcentages d'eau a une température T= 60°C.

1. Huile 0% d'eau

$$\tau = 3.95 + 7.47 \dot{\gamma}^{0.28}$$

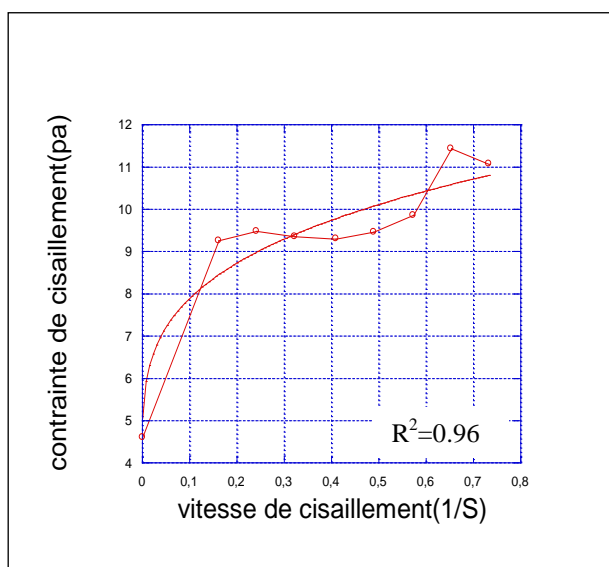


Figure III.30: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0% d'eau.

2. huile 1% d'eau

$$\tau = 1.6 + 6.89 \dot{\gamma}^{0.27}$$

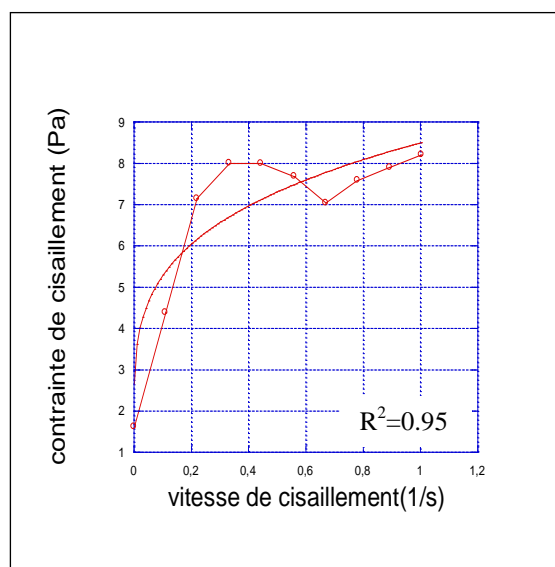


Figure III.31: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 1 % d'eau.

3. Huile 3% d'eau

$$\tau = 5.16 + 12.15 \dot{\gamma}^{0.2}$$

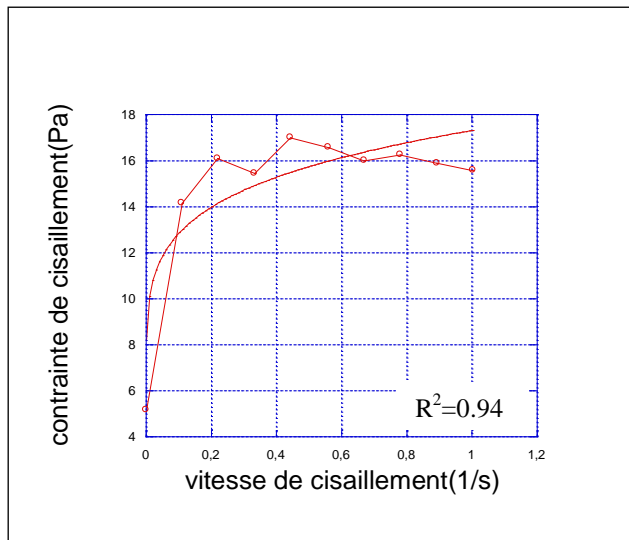


Figure III.32: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3 % d'eau

4. Huile 5% d'eau

$$\tau = 2.2 + 7.29 \dot{\gamma}^{0.22}$$

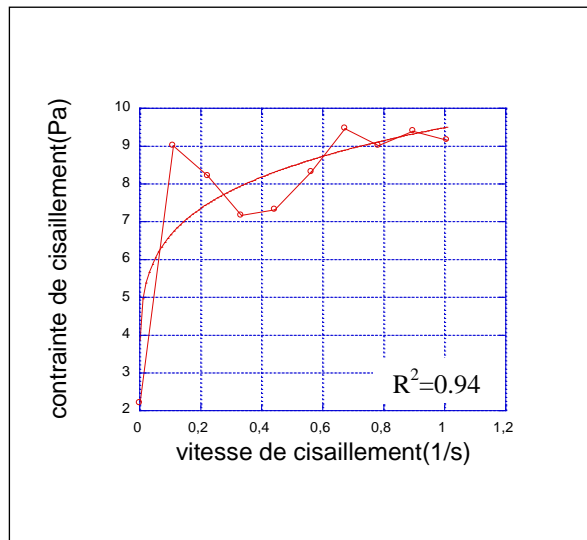


Figure III.33: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5 % d'eau.

5. Huile 10% d'eau

$$\tau = 0.74 + 4.96 \dot{\gamma}^{0.13}$$

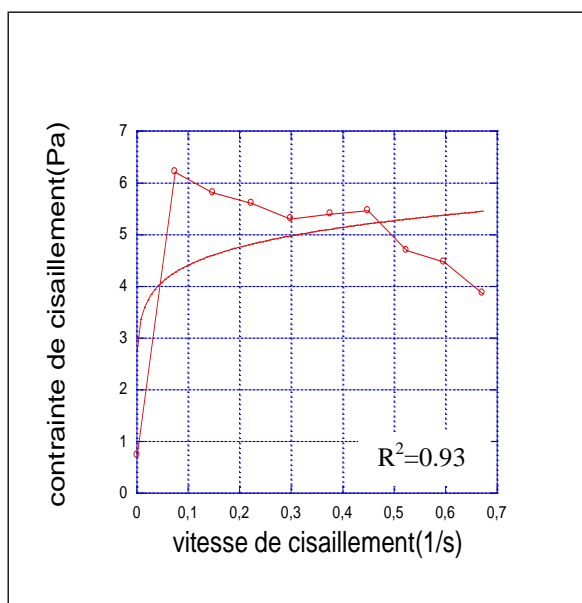


Figure III.34: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10 % d'eau.

6. Huile 20% d'eau

$$\tau = 29.57 + 173.57 \dot{\gamma}^{0.31}$$

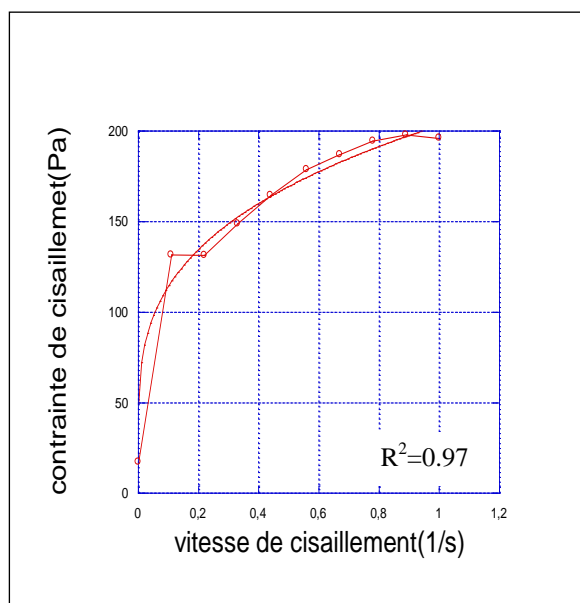


Figure III.35: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20 % d'eau.

7. Huile 40% d'eau

$$\tau = 1.56 + 6.50 \dot{\gamma}^{0.19}$$

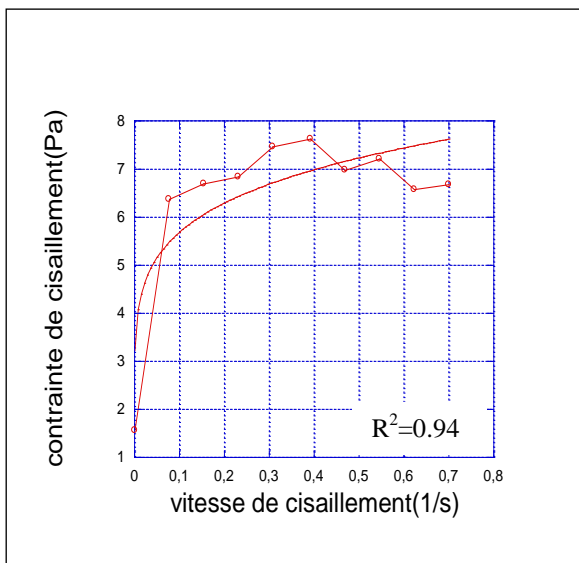


Figure III.36: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40 % d'eau.

8. Huile 50% d'eau

$$\tau = 9.3 + 22.08 \dot{\gamma}^{0.23}$$

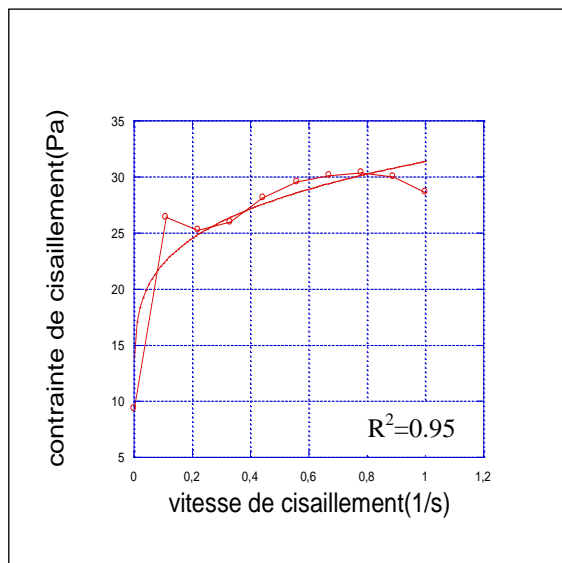


Figure III.37: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 50 % d'eau.

9. Huile 60% d'eau

$$\tau = 0.07 + 2.18 \dot{\gamma}^{0.21}$$

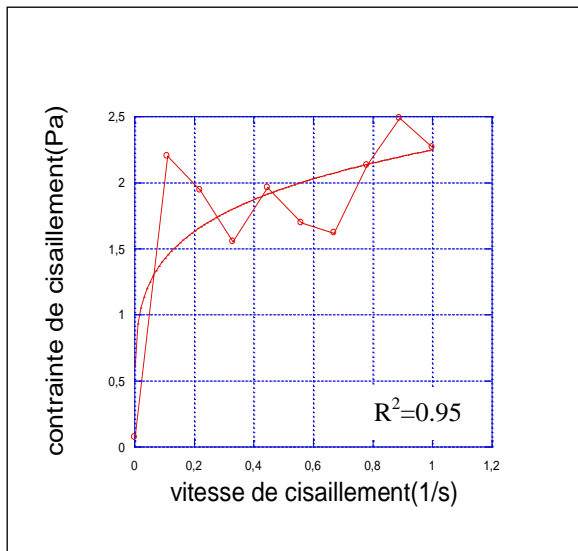


Figure III.38: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 60 % d'eau.

10. Huile 80% d'eau

$$\tau = 0.05 + 1.68 \dot{\gamma}^{0.70}$$

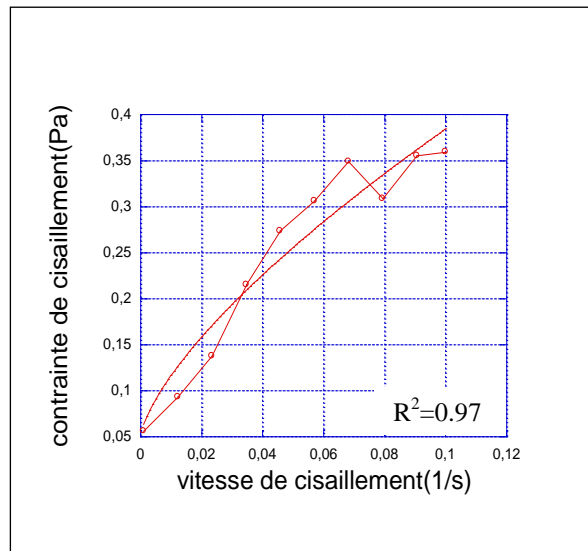


Figure III.39: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80 % d'eau.

11. Huile 85% d'eau

$$\tau = 4.8 + 21.23 \dot{\gamma}^{0.21}$$

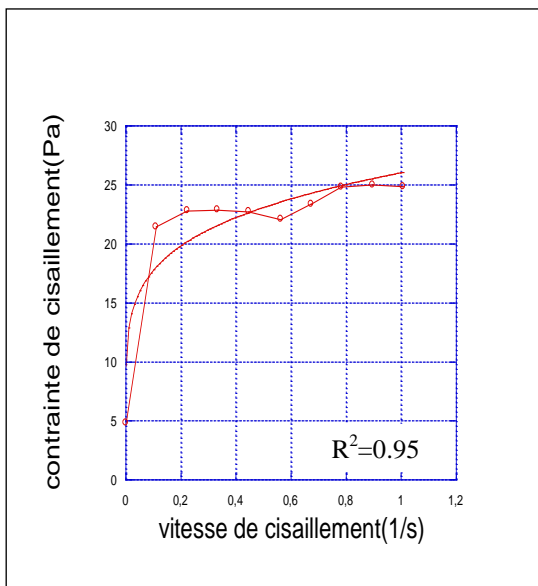


Figure III.40: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 85 % d'eau.

12. Huile 90% d'eau

$$\tau = 7.44 + 15.13 \dot{\gamma}^{0.19}$$

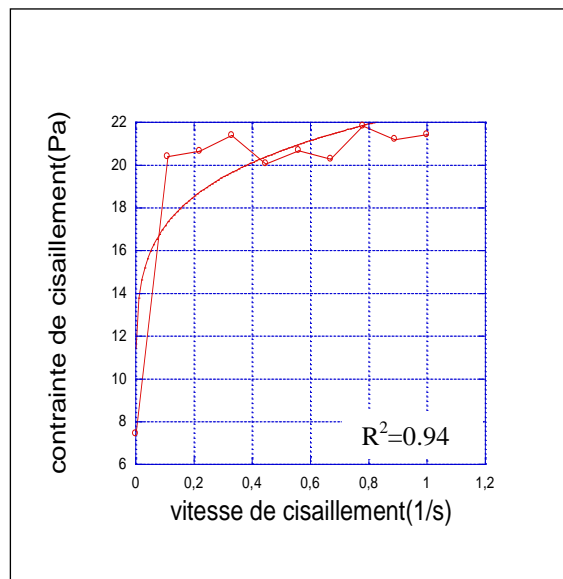


Figure III.41: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 90 % d'eau.

13. Huile 95% d'eau

$$\tau = 5.9 + 17.05 \dot{\gamma}^{0.18}$$

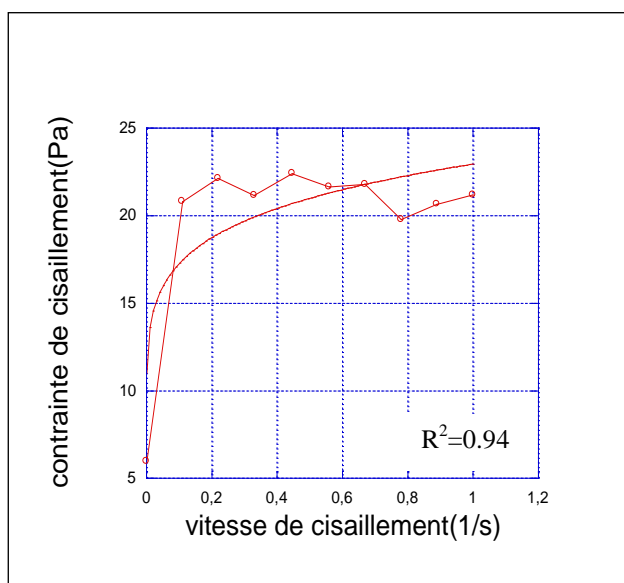


Figure III.42: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 95 % d'eau.

• Pour une température $T=80^{\circ}\text{C}$

Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour différents pourcentages d'eau a une température $T= 80^{\circ}\text{C}$.

1. Huile 0% d'eau

$$\tau = 2.28 + 5.79 \dot{\gamma}^{0.78}$$

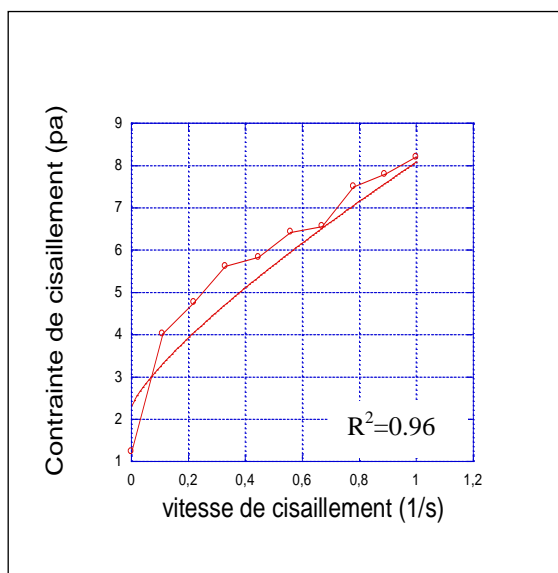


Figure III.43: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0 % d'eau.

2. Huile 1% d'eau

$$\tau = 2.68 + 6.74 \dot{\gamma}^{0.31}$$

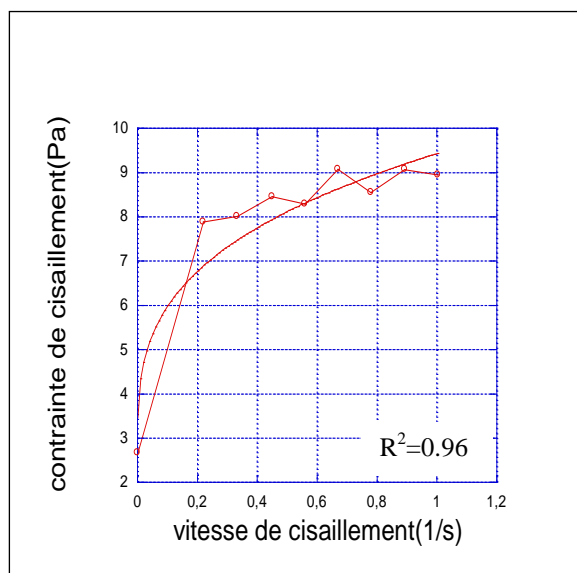


Figure III.44: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 1 % d'eau.

3. Huile 3% d'eau

$$\tau = 6.23 + 6.25 \dot{\gamma}^{0.08}$$

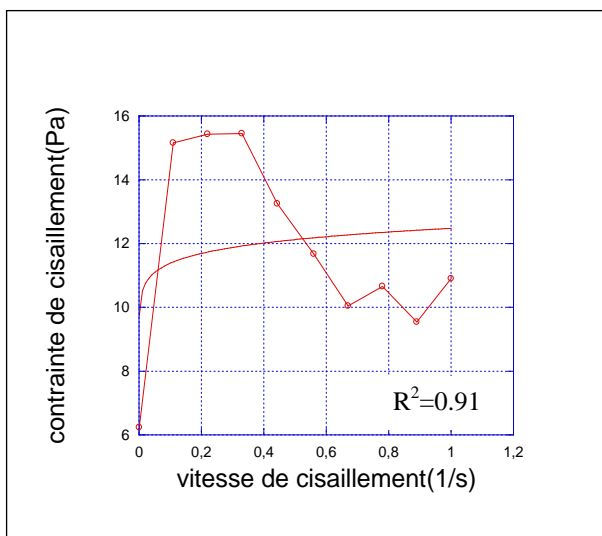


Figure III.45: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3 % d'eau.

4. Huile 5% d'eau

$$\tau = 2.66 + 4.41 \dot{\gamma}^{0.16}$$

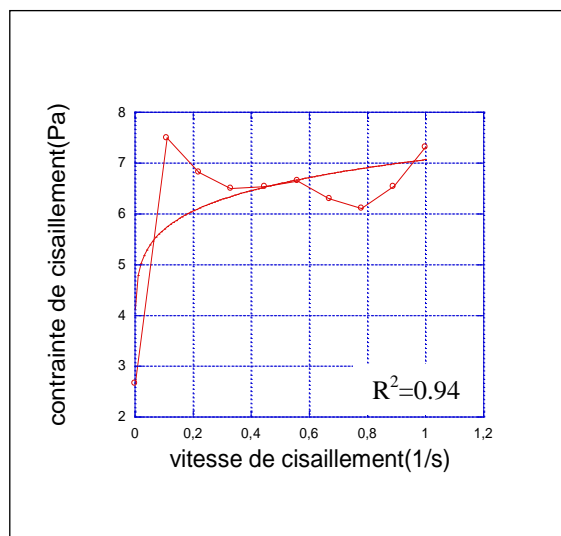


Figure III.46: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5 % d'eau.

5. Huile 10% d'eau

$$\tau = 0.72 + 1.51 \dot{\gamma}^{0.15}$$

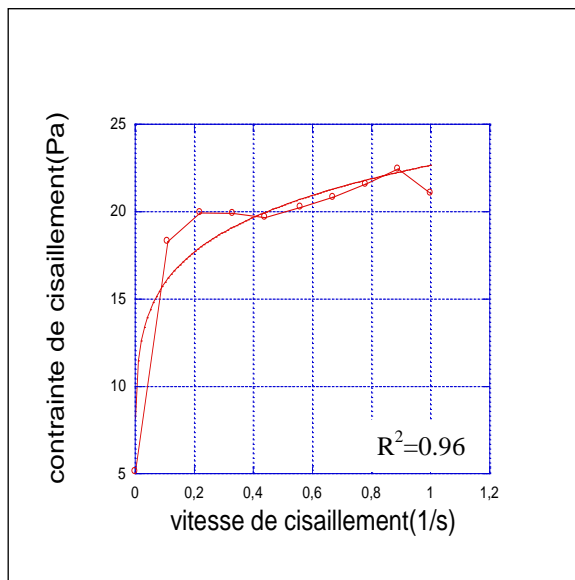


Figure III.47: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10 % d'eau.

6. Huile 20% d'eau

$$\tau = 3.87 + 19.26 \dot{\gamma}^{0.16}$$

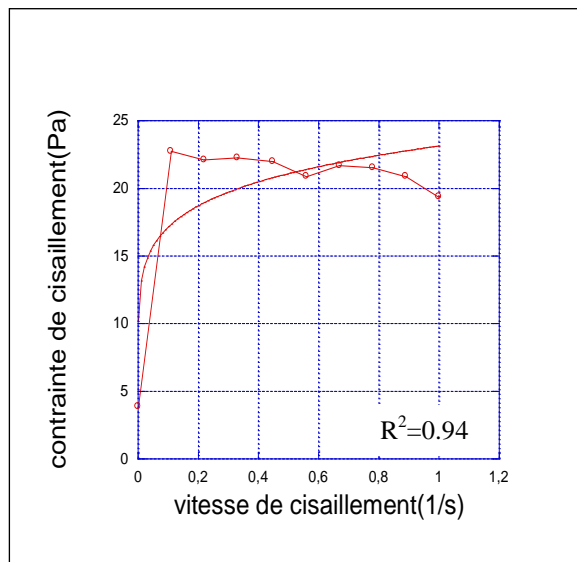


Figure III.48: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20 % d'eau.

7. Huile 40% d'eau

$$\tau = 0.70 + 4.54 \dot{\gamma}^{0.20}$$

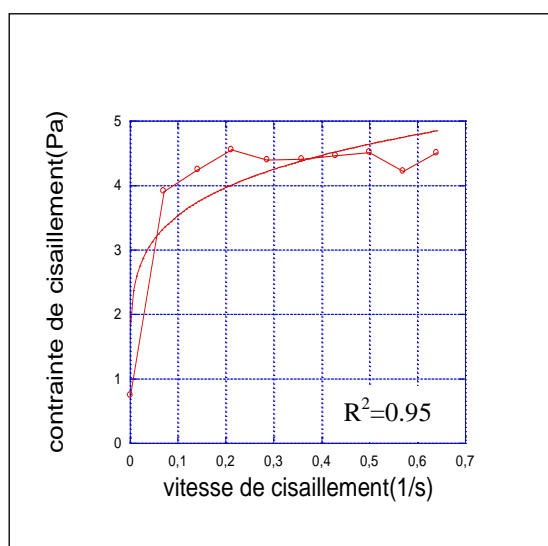


Figure III.49: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40 % d'eau.

8. Huile 50% d'eau

$$\tau = 6.99 + 17.14 \dot{\gamma}^{0.19}$$

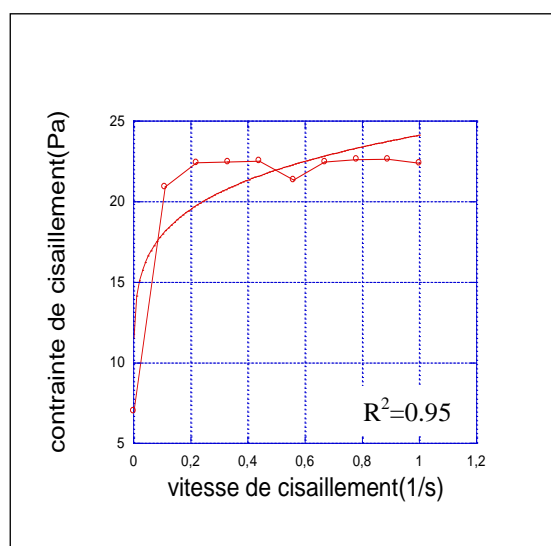


Figure III.50: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 50 % d'eau.

9. Huile 60% d'eau

$$\tau = 0.049 + 2.39 \dot{\gamma}^{0.15}$$

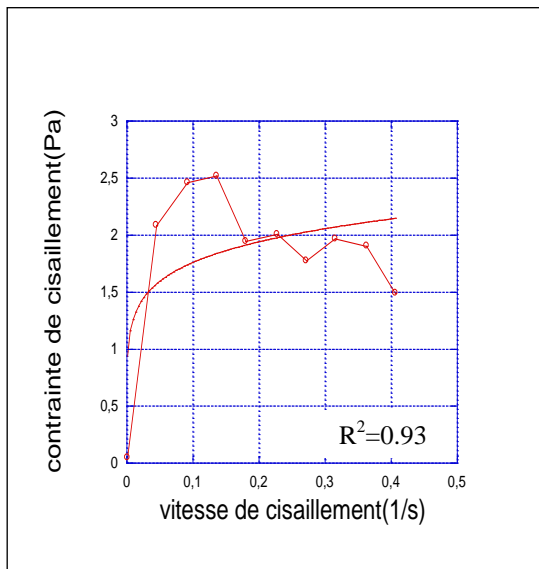


Figure III.51: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 60 % d'eau.

10. Huile 80% d'eau

$$\tau = 0.04 + 1.44 \dot{\gamma}^{0.61}$$

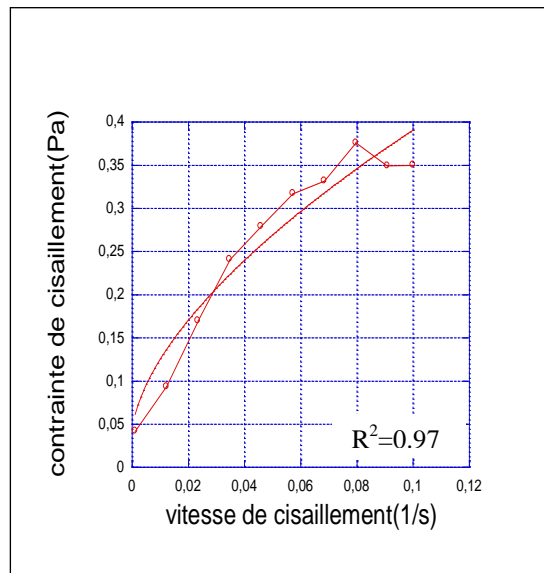


Figure III.52: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80 % d'eau.

11. Huile 85% d'eau

$$\tau = 10.17 + 20.38 \dot{\gamma}^{0.19}$$

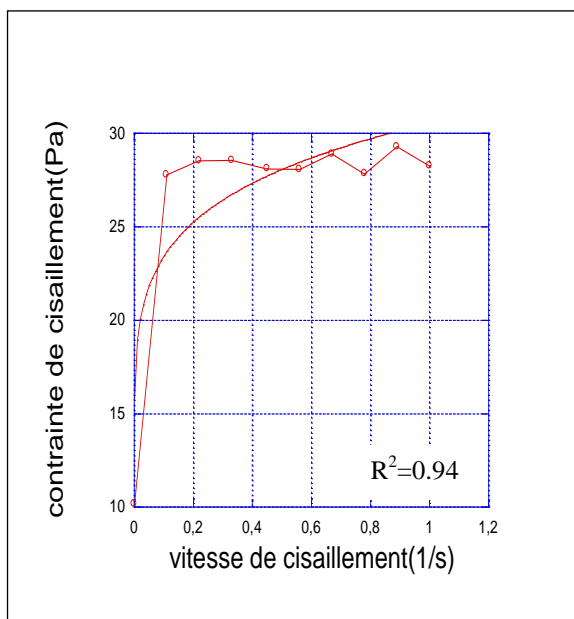


Figure III.53: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 85 % d'eau.

12. Huile 90% d'eau

$$\tau = 8.77 + 11.34 \dot{\gamma}^{0.19}$$

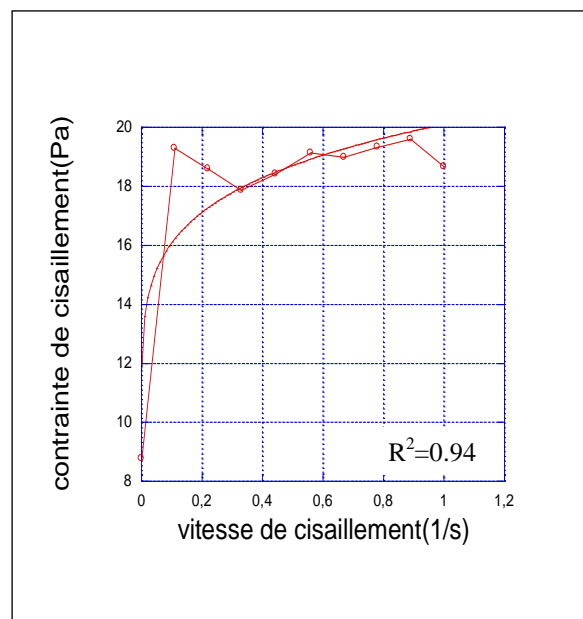


Figure III.54: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 90 % d'eau.

13. Huile 95% d'eau

$$\tau = 0.97 + 13.49 \dot{\gamma}^{0.11}$$

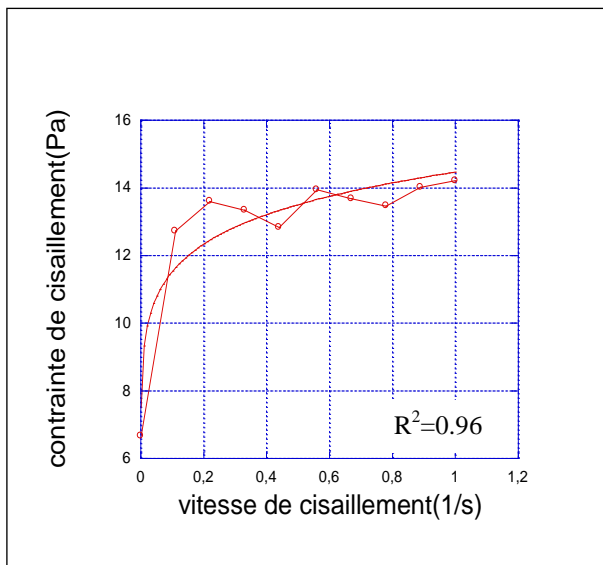


Figure III.55: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 95 % d'eau.

• Observation

Après avoir approximer toutes les courbes expérimentales on remarque que le comportement de ces différents échantillons est de type Herschell Berkeley, rhéofluidifiants.

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}^n \text{ avec } (n < 1) \tag{3.1}$$

• Récapitulatif

➤ Pour une température T= 25°C

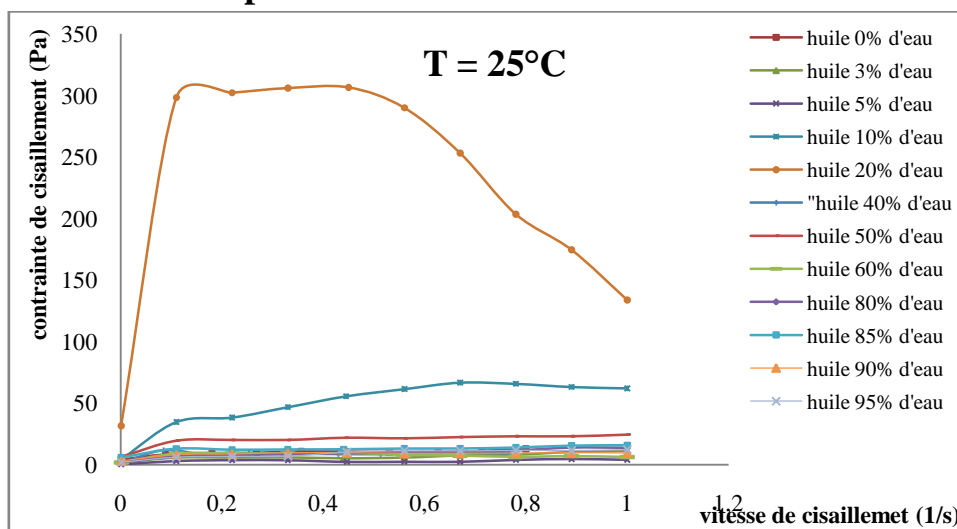


Figure III.56 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour une température de 25°C.

➤ Pour une température $T = 40^{\circ}\text{C}$

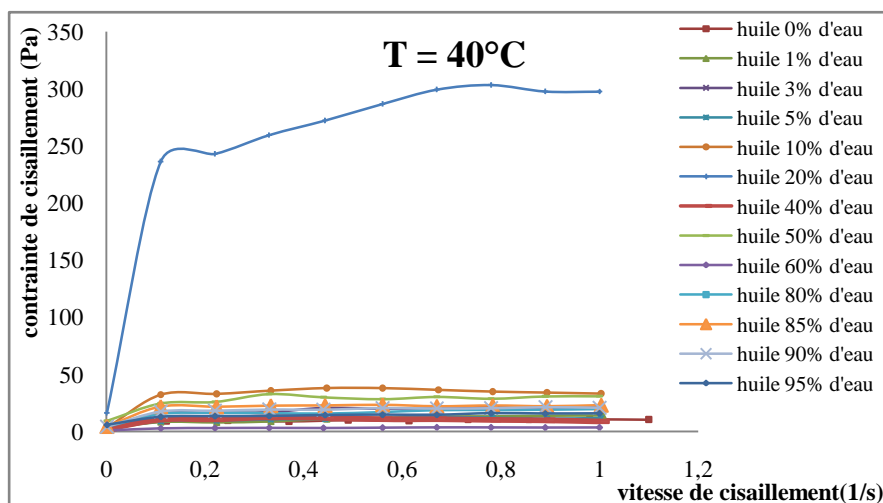


Figure III.57: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour une température de 40°C .

➤ Pour une température $T = 60^{\circ}\text{C}$

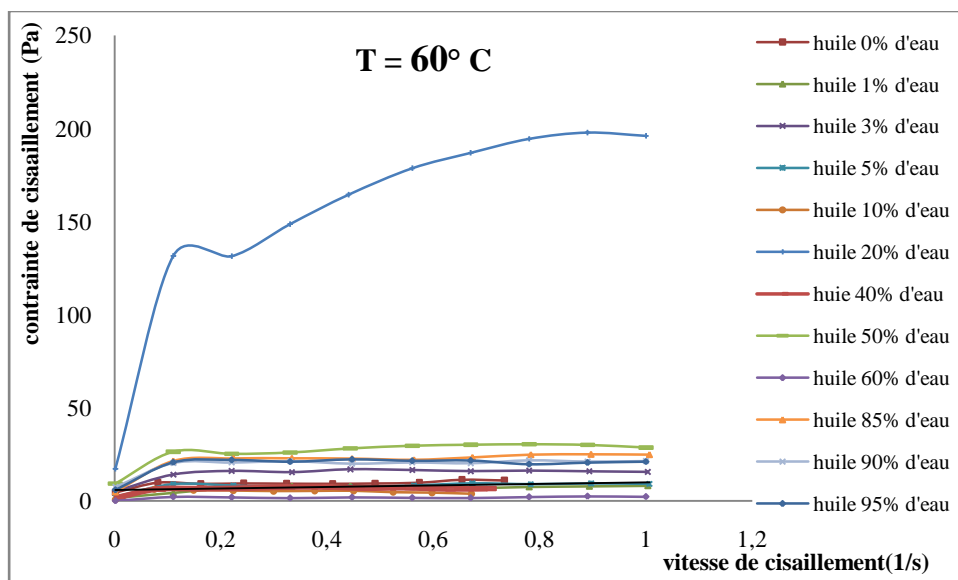


Figure III.58: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour une température de 60°C .

➤ Pour la température $T = 80^{\circ}\text{C}$

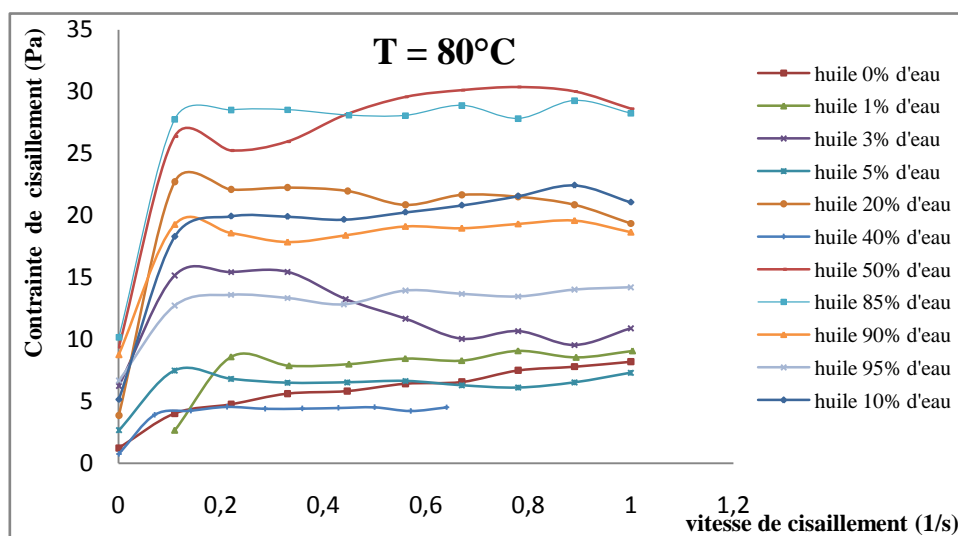


Figure III.59: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour une température de 60°C.

III.4.2. Influence de la température

Les courbes de 60 à 73, présentent les rhéogrammes des échantillons utilisés pour différentes températures.

On remarque que ce comportement est toujours de type Hershell Berkeley rhéofluidifiant.

formule (3.1)

1. Huile 0% d'eau

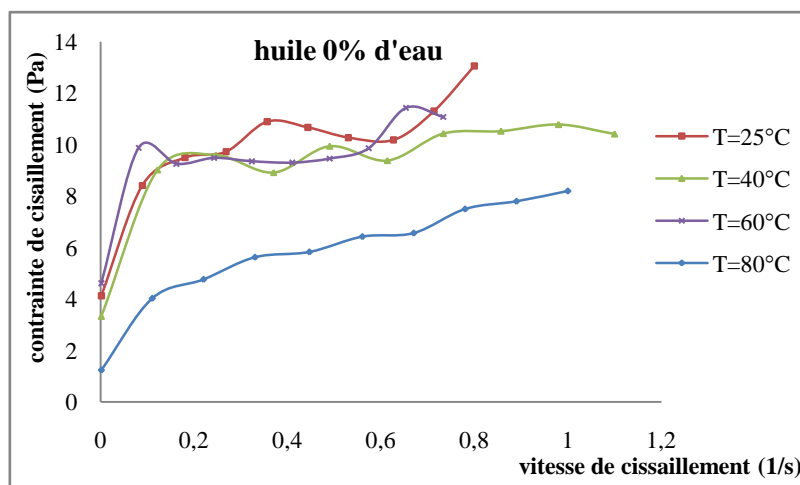


Figure III.60: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 0% d'eau.

2. Huile 1% d'eau

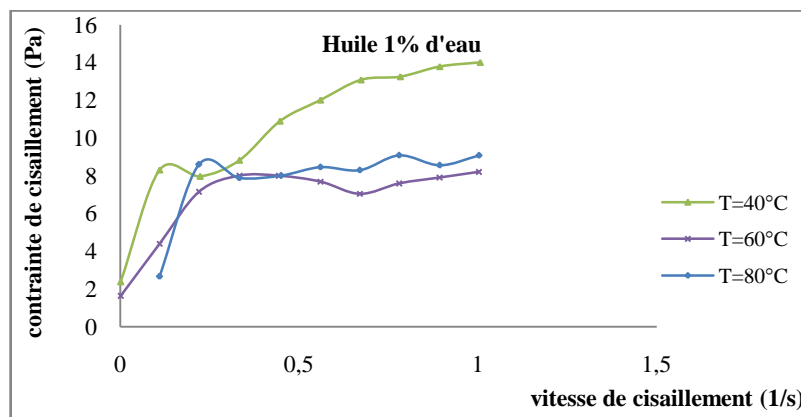


Figure III.61: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 1% d'eau.

3. Huile 3% d'eau

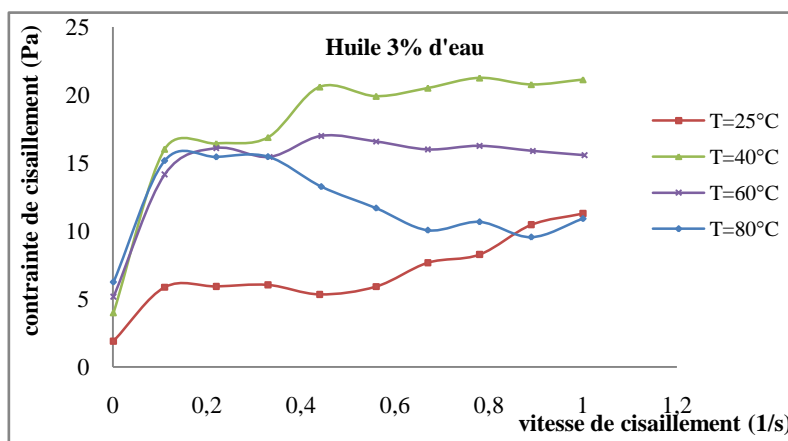


Figure III.62: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 3% d'eau.

4. Huile 5% d'eau

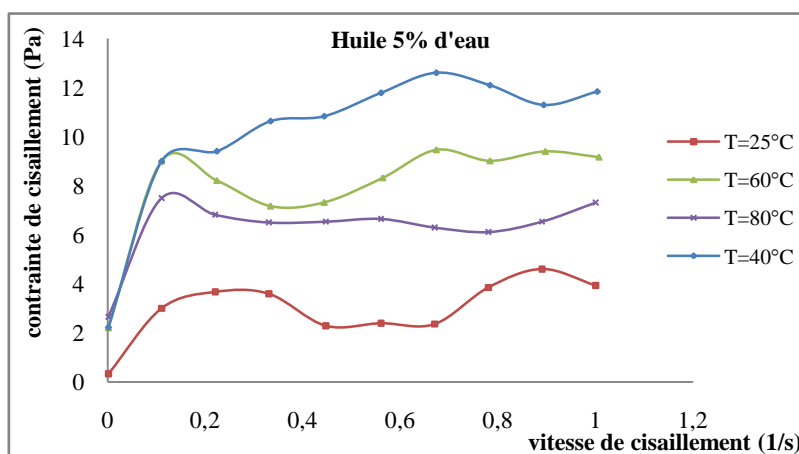


Figure III.63: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5% d'eau.

5. Huile 10% d'eau

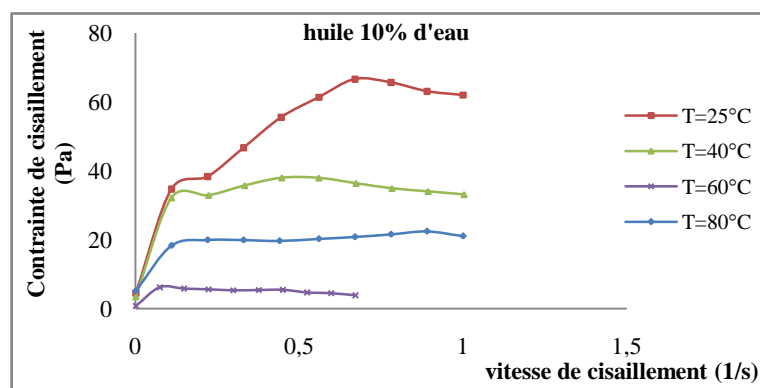


Figure III.64: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10% d'eau.

6. Huile 20% d'eau

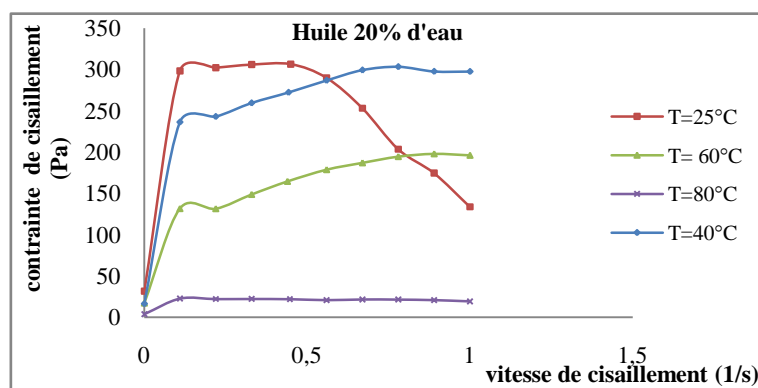


Figure III.65: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20% d'eau.

7. Huile 40% d'eau

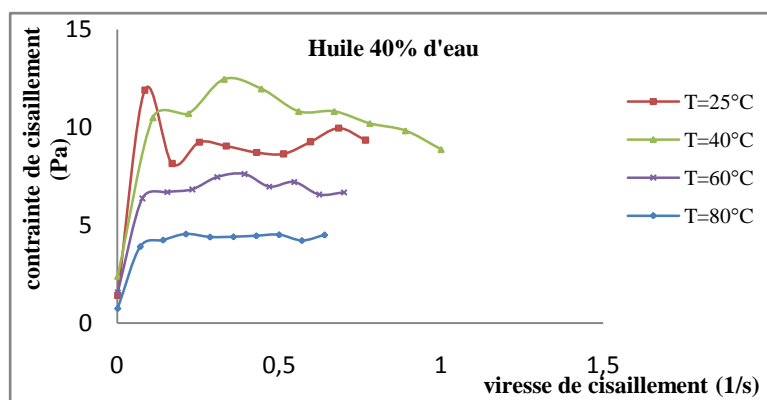


Figure III.66: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40% d'eau.

8. Huile 50% d'eau

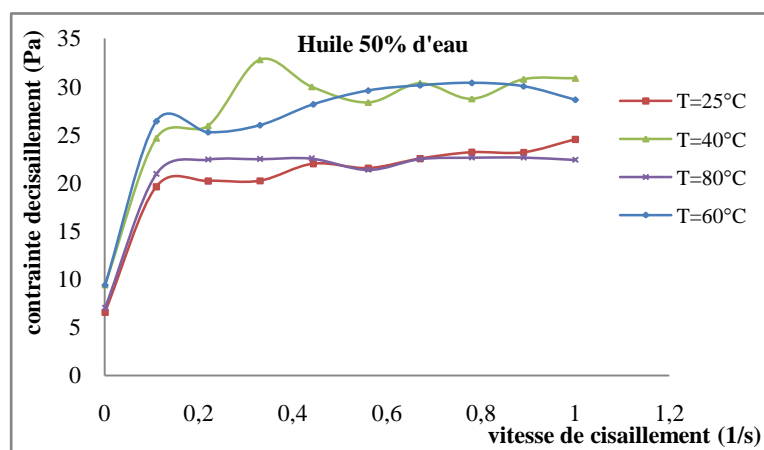


Figure III.67: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 50% d'eau.

9. Huile 60% d'eau

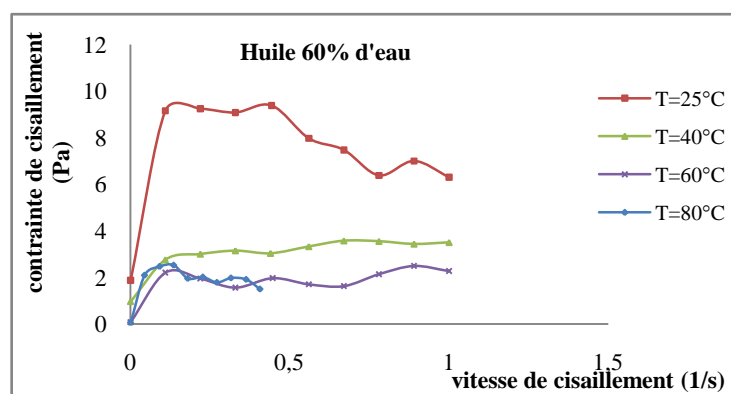


Figure III.68: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 60% d'eau.

10. Huile 80% d'eau

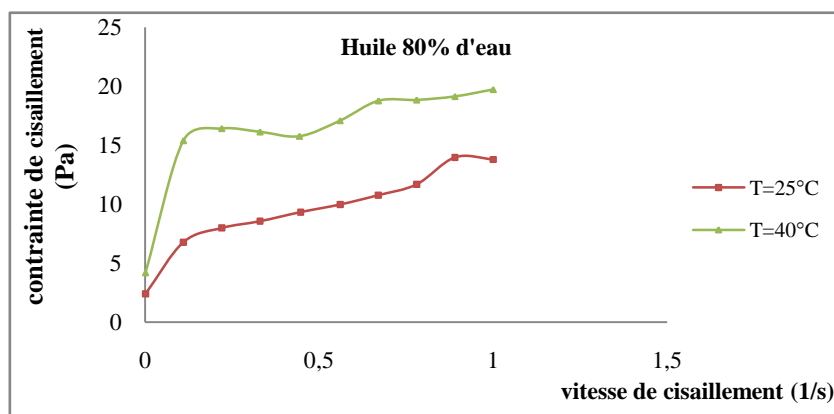


Figure III.69: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80% d'eau (25°C, 40°C).

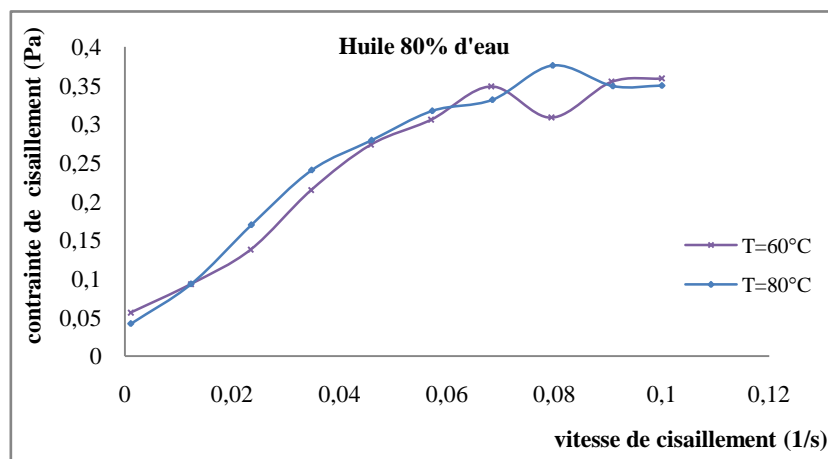


Figure III.70: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 80% d'eau (60°C, 80°C).

11. Huile 85% d'eau

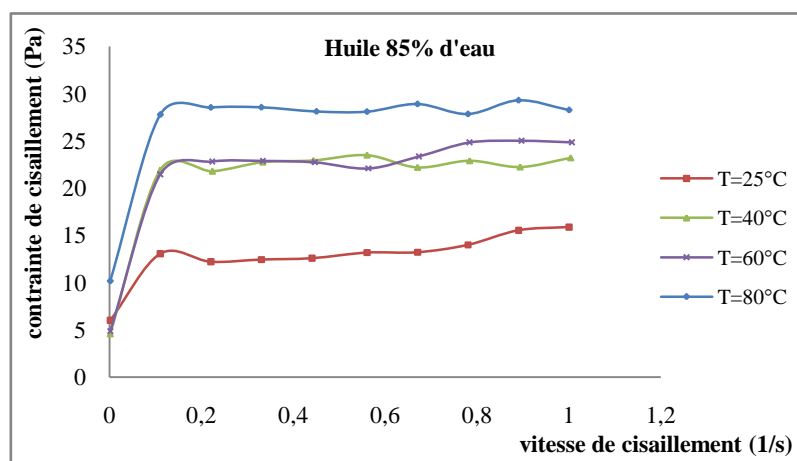


Figure III.71: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 85% d'eau.

12. Huile 90% d'eau

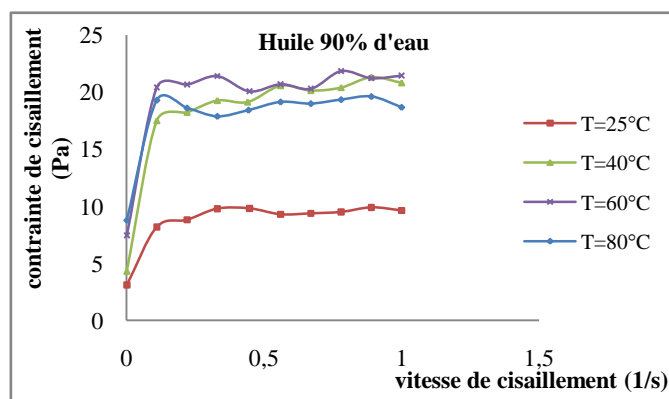


Figure III.72: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 90% d'eau (60°C, 80°C).

13. Huile 95% d'eau

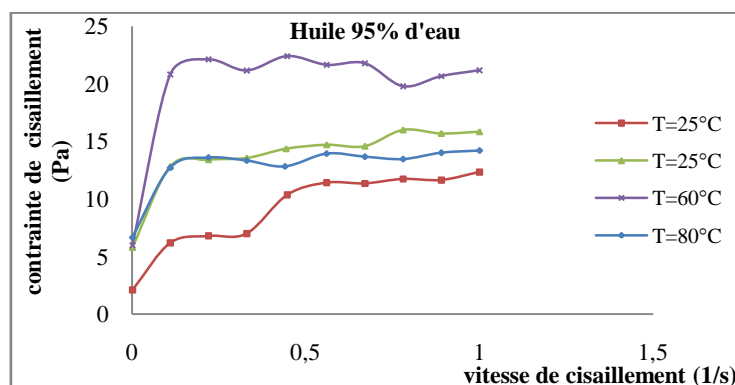


Figure III.73: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour 95%.

III.4.3. Evolution des paramètres rhéologiques intrinsèques en fonction du pourcentage d'eau

Les paramètres rhéologiques intrinsèque de notre matériau (huile de coupe) sont : la contrainte seuil τ_0 (Pa), la viscosité μ (Pa.s), et n (sans dimension) indice de pouvoir d'écoulement.

a. La contrainte seuil τ_0 (Pa)

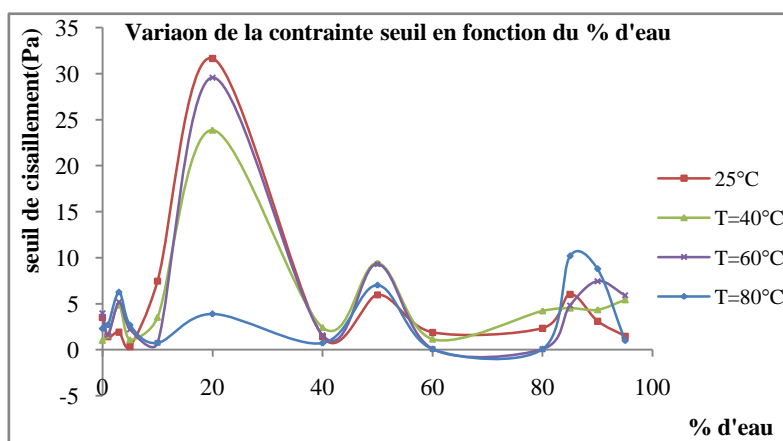


Figure III.74: Variation de la contrainte seuil en fonction du % d'eau.

- **Observations et interprétations**

Le seuil de cisaillement augmente avec le pourcentage d'eau, et atteint son maximum à 20% pour une température de 25°C, puis diminue pour se stabiliser à partir de 40%.

On peut expliquer cela, par le fait que l'échantillon dans lequel on a rajouté 20% d'eau, change d'aspect (il devient un gel), pour pouvoir le cisailé il faut appliquée une contrainte plus importante, donc le seuil de cisaillement est plus élevé.



Figure III.75 : Huile 20% d'eau.



Figure III.76 : Huile 40% d'eau.

b. la viscosité μ (Pa.s)

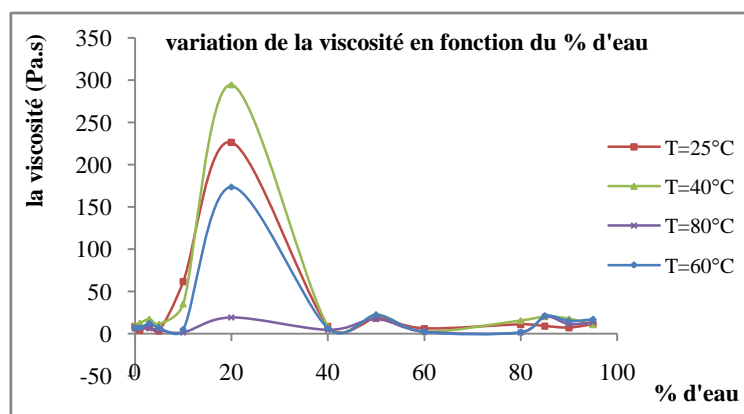


Figure III.77: Variation de la viscosité en fonction du % d'eau.

- **Observation**

La viscosité augmente avec le pourcentage d'eau, et atteint son maximum à 20%, puis elle diminue pour se stabiliser à partir de 40%. On peut expliquer cela du fait que l'échantillon à ce pourcentage (c.à.d. avec un ajout de 20% d'eau) est comme un gel, donc il a une viscosité plus grande que celle du liquide.

c. Indice de pouvoir d'écoulement n (sans unité)

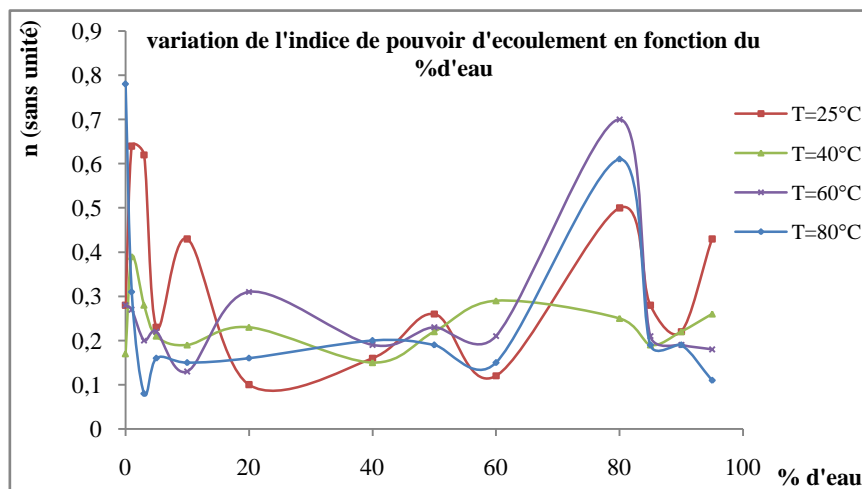


Figure III.78: Variation de l'indice de pouvoir d'écoulement en fonction du % d'eau.

• Observation

L'indice de fluidité a un comportement inverse de celui de la viscosité. C'est-à-dire, il est élevé quand l'échantillon est liquide, il diminue lorsque l'huile coagule.

III.4.4. Evolution des paramètres rhéologiques intrinsèques en fonction de la température

a. La contrainte seuil τ_0 (Pa)

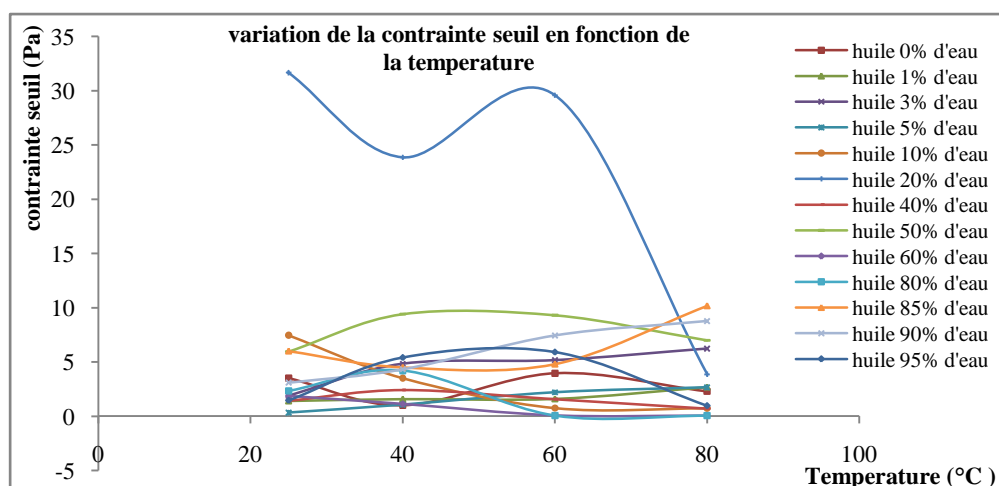


Figure III.79: Variation de la contrainte seuil en fonction de la température.

• **Observations et interprétations**

L'évolution de la contrainte seuil en fonction de la température T est stable quelque soit le pourcentage d'eau ajouter, sauf pour le cas de 20%, pour pouvoir interpréter ce résultat, il faut plus d'investigation.

b. la viscosité μ (Pa.s)

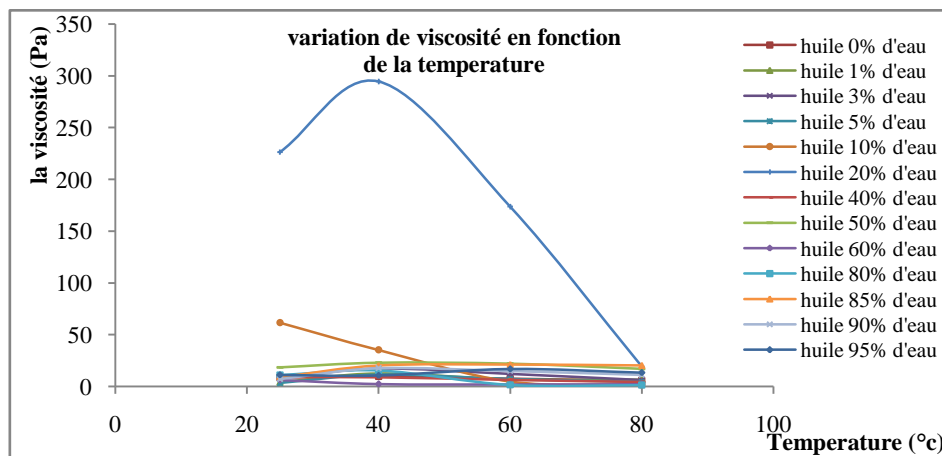


Figure III.80: Variation de la viscosité en fonction de la température.

• **Observations et interprétations**

Pour les différentes températures la viscosité est stable, mise a part a 20% d'eau ou elle est bien plus élevée, son maximum est enregistré a 40°C.

c. Indice de pouvoir d'écoulement n (sans unité)

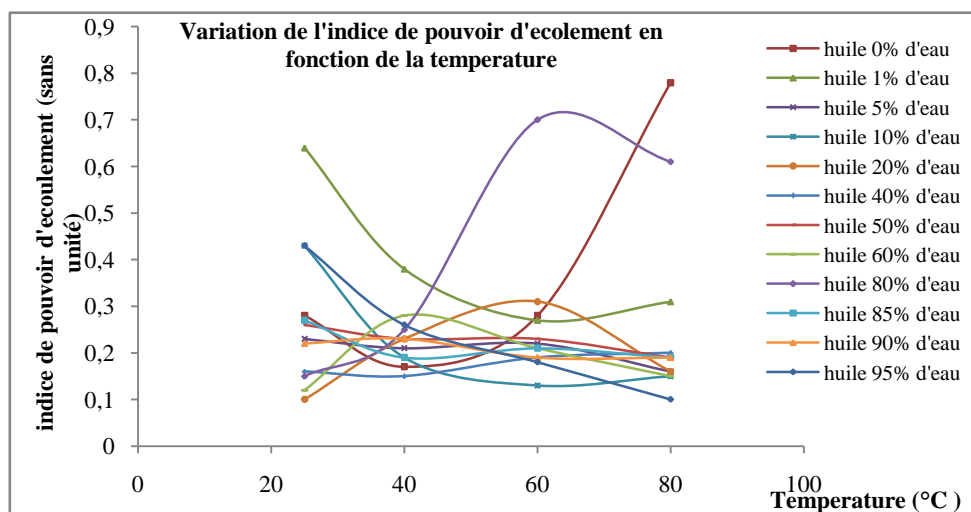


Figure III.81: Variation de l'indice de pouvoir d'écoulement en fonction de la température.

- **Observations et interprétations**

Avec l'augmentation de la température l'indice de pouvoir d'écoulement diminue, mise a part a 0% et 80% d'eau ou il augmente avec elle, par ce que ces deux échantillons sont plus fluides.



Figure III.82 : Huile 80% d'eau.

Figure III.83 : Huile 0% d'eau.

Conclusion générale

Ce travail d'initiation à la recherche a été effectué dans le cadre de notre stage de maîtrise académique en génie mécanique option construction mécanique.

Le but était de déterminer l'influence de la température et de l'ajout de l'eau sur le comportement rhéologique des huiles de coupes. En effet, les lubrifiants utilisés lors de l'usinage des pièces mécaniques, sont constitués d'une huile de coupe et de l'eau. L'ajout d'une faible quantité d'eau rend l'huile pâteuse, l'ajout d'une grande quantité, l'huile perd sa caractéristique lubrifiante.

Dans ce travail, nous avons cherché en premier lieu à déterminer le comportement rhéologique de l'huile et essayer de comprendre l'influence de la température et de l'eau sur les paramètres rhéologiques intrinsèques (seuil de cisaillement, la viscosité et l'indice de fluidité) de l'huile de coupe.

Ainsi une campagne expérimentale, menée sur l'huile, a été effectuée. Nous avons réalisé des tests sur le comportement rhéologique à l'état stationnaire sous l'essai de cisaillement du type plan-plan, pour déterminer le seuil de cisaillement τ_0 , la viscosité μ et l'indice de pouvoir d'écoulement.

Différentes conclusions peuvent être retenues.

- le comportement rhéologique des échantillons étudiés est de type Herschell Berkeley : $\tau = \tau_0 + \dot{\gamma}^n$ rhéofluidifiant ($n < 1$).
- Un maximum de la viscosité et de la contrainte seuil est observé pour un ajout de 20% d'eau, ce qui correspond au caractère gel de l'échantillon.
- La viscosité et la contrainte seuil diminue en fonction de la température.
- Quand la viscosité et la contrainte seuil augmentent, l'indice de pouvoir d'écoulement diminue.

Références Bibliographiques

- [1] : Guy Couarraze, Jean –Louis Grossiord.
« Initiation a la rhéologie », 3^{ème} édition.2000
- [2] : Mr A. Ouibrahim, Cours de « fluides complexes ».
- [3]: Macosko C.W. « Rheology Principles, Measurement, and Applications.
V C H Publisher»1994.
- [4] : Bouras .Rachid« Rhéologie des pates cimentaires pour bétons autoplaçants». Thèse de doctorat L'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2010.
- [5] : Mr Daddou. «Les caractéristiques physiques de la boue de forage». Document sonatrach, juillet»2009.
- [6] : Godet, M. « Les Fondements mécaniques de la tribologie». In : Mécanique Matériaux Électricité, 1972.
- [7] : G.Zambellili, L.Vincent, « Matériaux et Contacts, une approche tribologique »Polytechniques et Universitaires Romandes1998.
- [8] : Jean-Marie George. « Frottement, usure et lubrification » Eyrolles, 2000.
- [9] :M. Delque, « Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma », Thèse doctorat, École des Mines de Paris, 2007.
- [10] : A. S. Adamou, « Comportement tribologique et réactivité de l'alliage 718 en atmosphère contrôlée et a haute température», Thèse doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [11] : Han Jörg Mathieu, Erich Bergman, René Gras, « Traité des matériaux, analyse et technologie des surfaces, couches minces et tribologie».
- [12] : R. Courtel « vue passées et présentes sur les mécanismes du frottement »,
Page : 23 RMF, N°66 1978
- [13] : Gilles Petite : « Contribution a la compréhension des mécanismes élémentaires d'usure Douce des élastomères charges réticules», Ecole centrale de Lyon Thèse de doctorat le 2003.
- [14]: P. Bowden et Tabor. « Friction and lubrification » Tome I.
- [15]: H. A. Abdel-Aal; « Division of frictional heat: the dependence on sliding parameters», Unt. Comme. Heath Mass Transfer.1999
- [16]: A. Bohage, « Produits de Graissage et de Protection», Edition Cemagraf, Paris, (2000).

Références Bibliographiques

[17] : S Zhu, « Etude des traitements Physico-chimique d'Equation des Emulsions d'Huile de coupe, Influence de leur Formation», Thèse de Doctorat, INSA, Toulouse1990.

[18] : Cetim, « Guide d'emploi des fluides de coupe».
Edition du Cetim, volume 1, Paris 1979.

[19] : F.Edeline, « L'Equation Physico-chimique des Eaux, Technique et Documentation»,
Edition Cebedoc 1996.

[20] : Norme française NF ISO 67437, «Lubrifiants, Huiles Industrielle et Produits Connexes», Paris 1987.

[21]: A. Menniti, K. Rajagopalan, T.A. Kramer, M.M. Clark.
« An evaluation of the colloidal stability of metal working fluid », J. ColloidalInt. Sci 284 (2005) 477-488.