



UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU

FACULTÉ DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

«Mémoire »

De fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique Académique

Thème :

*« L'influence de la température
et du pourcentage d'huile ajouté
sur les paramètres rhéologiques
des huiles de coupe »*

Proposé et dirigé par :

Dr : BOURAS Rachid

President de jury :Mr Bahtani

Membre de jury :Mr karkadi

Présenté par :

Mr : CHAHINE Yazen

Mr : AKSOUM Ahmed

*« Qui fait revivre la science, Vivera à jamais...
..Et qui a la richesse de pensée ne rencontra jamais la pauvreté »
Ali ibn Abi Talib (psl)*

On aimerait d'abord remercier notre encadreur Dr BOURAS Rachid, pour son enseignement et son encadrement.

Grâce à lui, on a appris la méthode de recherche, l'analyse et l'interprétation des résultats.

Tout au long de ce mémoire, ses conseils pertinents avec écoute, amabilité et patience ont permis à notre travail d'aboutir et de voir le jour.

On remercie aussi l'ingénieur ANAIS Hamid pour son aide pendant l'expérience.

On remercie aussi le président de jury Mr Bahtani pour l'enseignement durant notre cursus en énergétique et l'accepte de présider ce jury, et le membre du jury Mr karkadi pour l'honneur qu'ils nous font en jugeant notre travail.

On tient aussi à remercier nos proches pour leur soutien et leur patience.



Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail,
à mes parents si chers et précieux a celui qui me fais connaître la
patience et le courage et a celui que ne cesse pas d'attendre ma réussite très
cher père et a celle qui m'a fais ouvrir les yeux à la vie et éveille les nuits sur
moi très cher mère.*

*à mes très chères sœurs a qui j'approuve mes sincères sentiments de
respect et avec qui je partage le malheur et le bonheur.*

*à la famille BEN.MESSLI en particulier ma sœur Nacera et ses
enfants Faiz , Alilou et Wahiba.*

*à la famille CHOUKACHE en particulier ma sœur Malika et ses enfants
Younes et Meriem.*

*à la famille SADOUDI en particulier ma sœur Sadia et ses petite ange
Lynda et oualie.*

*à la famille BOUSSAHA particulièrement ma cher sœur Kahina et sa petite
fille houria.*

à la famille OUAHABE particulièrement ma très cher Kathia.

*à mes chers amis et a tous ceux qui je ne préfère pas d'entreprendre de lister
de peur
D'en oublier.*

Ahmed



« Dédicaces »

Je rends grâce à dieu de m'avoir
Donné la santé, le courage et la volonté.

Je dédie ce travail à :

À ma chère mère ; mon modèle pour la force et le courage

À mon père ; avec lequel la situation n'a pas permis qu'on
partage ensemble cette joie

À mes sœurs ; Racha et Rana

À mon frère ; Rami

À ma chère LoLa <3

À mon Khey Abdou

À mes amies ; Dyhia, Fatma, Kahina, Nesrine
Salsabil, Salika.bis, Wahiba, Zahia et Zahoa

À mes amis ; Ahmed, Amer, Djaffar, Ghiles,
, Hamza.bis, Karim, Malik, Mmd, Razki
Nassim, Rikta, Said.bis, Samir, Toufik et Yanis

Yazen

• Avant-propos	I
• Remerciements	II
• Dédicaces	III
• Liste de figures.....	V
• Liste de tableaux.....	XI
• Nomenclature.....	XIV
• Sommaire	XV
• Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : LES HUILES DE COUPE

• Introduction	4
I. Fluides de coupe	4
II. Etude général sur les lubrifiants	5
1) Etude statistique et économique.....	5
2) Les propriétés des lubrifiants.....	7
3) Les additifs	9
4) Huile de graissage.....	9
5) Les graisses.....	9
6) Classification de fluide de coupe	11
7) Les différents types de fluides de coupe	12
III. Composition de différents types de fluide de coupes	13
1) Composition générale des huiles de coupes insolubles.....	13
2) Composition des huiles de coupe solubles ou émulsifiables.....	13
3) Composition des fluides de refroidissement (synthétiques).....	14

IV.	Huiles de coupe solubles	15
1)	Introduction aux fluides de coupe solubles	15
2)	Procédés d'usinage en utilisant les fluides de coupe soluble.....	15
3)	Les différent type de huile soluble	17
4)	Les Huiles de coupe entières.....	18
5)	Huile de coupe minérale soluble	19
6)	Microémulsions semi-synthétiques	19
7)	Les huiles solubles synthèse	20
V.	Maintenance et stockage du fluide de coupe.....	21
1)	Les données représentatives du produit.....	21
2)	Quelques règles générales pour le stockage	22
VI.	Les huiles usagés.....	22
1)	Caractéristiques des huiles usagées	22
2)	Le suivi de la collecte et de l'élimination	24
3)	Risque de l'huile de coupes sur les travailleurs	24
4)	Précautions contre les risques d'huiles de coupes	26
5)	Cadre réglementaire applicable aux fluides de coupe	26
6)	Récupération des huiles usagées en France.....	27
•	Conclusion.....	28

CHAPITRE II : NOTION GENERALE SUR LA RHEOLOGIE

•	Introduction	29
•	La science de rhéologie	29
I.	Définition de la rhéologie	29

II.	Etude de quelques propriétés élémentaires du comportement des matériaux	30
1)	Le comportement élastique	30
2)	Le comportement plastique	31
3)	L'élastoplasticité.....	32
4)	Le Comportement visqueux	33
5)	La viscoélasticité : le modèle de Maxwell.....	34
6)	La viscoélasticité : le modèle de Kelvin Voigt.....	39
III.	Caractéristiques rhéologiques	41
1)	Equation rhéologique fondamentale.....	41
2)	Contrainte de cisaillement	41
3)	Gradient de vitesse	41
4)	Déformation de cisaillement.....	42
5)	Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$	43
6)	Le Seuil de cisaillement.....	44
7)	La loi de HERSCHELL BULKLEY	44
8)	Rhéogrammes	44
9)	Viscosités	45
10)	Typologie des différents modes d'écoulement	48
1.	Les liquides linéaires de newton.....	48
2.	Les fluides pascaliens	50
3.	Les fluides non linéaires ou non Newtoniens	51
11)	Variation du comportement rhéologique d'écoulement du liquide avec le temps	57
1.	Les fluides thixotropes	57
2.	Les fluides antithixotropes.....	61

IV. Principes et description des principaux rhéomètres	62
1) Rhéomètres à régime permanent	63
2) Rhéomètre a régime transitoire	69
3) Rhéomètres dynamiques ou oscillants.....	71
• Conclusion.....	74

CHAPITRE III : MODE EXPERIMENTAL

• Introduction	75
I. dispositifs expérimentaux	75
1. Appareillage.....	75
2. Rhéomètre HAAKE RheoStress 1	75
3. À propos RheoStress 1	75
4. Logiciel HAAKE RheoWin	76
1) Modules logiciels.....	76
2) Affichage / unité de contrôle.....	77
5. Matériels.....	78
II. Manipulation.....	80
1. Préparation du Mélange de 20% de l'huile pour Différentes températures du mélange considéré idéal (Eau +20 % Huile)	80
2. Influence de la température sur le comportement rhéologique pour 20 %....	81
3. Résultats Logiciel HAAKE RheoWin.....	81
A. Analyse des résultats expérimentaux.....	83
B. Conclusion.....	83
4. Manipulation pour tous les pourcentages	85
1) Préparation du mélange (Eau + Différentes % Huile).....	85

2) Calcul de Mélange pour différentes températures	86
3) Résultats Logiciel HAAKE RheoWin.....	87
A. $\tau=f(\gamma')$ à 35°C pour différents pourcentages	87
B. $\tau=f(\gamma')$ à 40°C	92
C. $\tau=f(\gamma')$ à 60°C	98
D. $\tau=f(\gamma')$ à 80°C	102
E. Analyse de résultats et conclusion.....	107
4) Etude de l'Influence de % d'huile ajouté sur les paramètres Rhéologiques intrinsèques	107
A. Sur la viscosité	107
A.g Conclusion	111
B. Sur le seuil de cisaillement	111
B.g Conclusion	114
5) Etude de l'Influence de Température sur les paramètres Rhéologiques intrinsèques de fluide	115
A. Sur la viscosité)	115
A.l. Conclusion.....	121
B. le seuil en fonction de la température	122
B.l. Conclusion	128
• Conclusion.....	128
• Conclusion générale	130
• Références bibliographiques	131

- Liste de figures chapitre 1

Fig.I.1 Consommation mondial de lubrifiant selon le type de lubrifiant.....	6
Fig.I.2 Répartition géographique de marché des lubrifiants en 2007	6
Fig.I.3 Fluide de coupe en usinage	10
Fig.I.4 Rôle des lubrifiants et de leurs additifs dans les différentes applications d'usinage industriel	10
Fig.I.5 Composition générale du lubrifiant.....	11
Fig.I.6 Formation du copeau lors de l'usinage	16
Fig.I.7 Les différents types de huiles solubles	16
Fig.I.8 Exemple d'un fluide de coupe commercialisé.....	18
Fig.I.9 Huile de lin soluble dans l'eau commercialisé	18
Fig.I.10 Huile de coupe synthétique en émulsions.....	20

- Liste de figures chapitre 2

Fig.II.1 Modèle analogique 1D élastique.....	30
Fig.II.2 (1.2) Courbe contrainte-déformation et courbe déformation transversale-déformation longitudinale pour un essai de traction uniaxial sur un matériau élastique	31
Fig.II.3 Modèle analogique 1D plastique	32
Fig.II.4 Modèle analogique 1D élastoplastique.....	33
Fig.II.5 Modèle analogique 1D élément visqueux.....	33
Fig.II.6 Comportement élastique et visqueux d'un échantillon viscoélastique	34
Fig.II.7 Contrainte en fonction du temps	34
Fig.II.8 Modèle analogique 1D viscoélastique	35
Fig.II.9 Résultat d'un essai de relaxation en cisaillement pour le modèle rhéologique de Maxwell	36
Fig.II.10 Essai de fluage en cisaillement pour le modèle rhéologique de Maxwell.....	37
Fig.II.11 Essai de fluage (contrainte imposée) suivi de relaxation.....	38
Fig.II.12 Modèle analogique 1D de Kelvin – Voigt	39
Fig.II.13 Résultat d'un essai de relaxation en cisaillement pour le modèle de Kelvin – Voigt.....	40

Fig.II.14 Résultat d'un essai de fluage en cisaillement pour le modèle rhéologique..	40
Fig.II.15 Gradient de vitesse ; (déformation en fonction de la vitesse.....)	42
Fig.II.16 Déformation en fonction de la distance x ; (déformation de cisaillement)	43
Fig.II.17 Contrainte δ en fonction de vitesse de cisaillement (Fluide à seuil = δ_s)....	44
Fig.II.18 Rhéogramme cas générale gaz ou liquide pure.....	44
Fig.II.19. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement dans un fluide.....	46
Fig.II.20 a, b, c Fluides Newtoniens	49
Fig.II.21 La déformation en fonction de la vitesse de cisaillement à partir de seuil ...	51
Fig.II.22.a Courbe de déformation et de fluage en fonction de t	52
Fig.II.22.b Rhéogramme $dv/dt = f(\tau)$	52
Fig.II.23 Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour un Corp. Rhéofluidifiant.....	53
Fig.II.24 Variation de la fluidité apparente d'un corps fluidifiant en fonction de la vitesse du cisaillement	54
Fig.II.25.a Courbe de fluage	55
Fig.II.25.b Rhéogramme vitesse de cisaillement en fonction de déformation	55
Fig.II.26. Rhéogramme de fluide rheo-épaississants	56
Fig.II.27. La viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour différents fluides.....	57
Fig.II.28 Les 4 grands types d'écoulement.....	57
Fig.II.29 Cycle d'hystérésis d'un fluide pseudoplastique	58
Fig.II.30 Viscosité apparente en fonction du temps à vitesse de cisaillement constante.....	58
Fig.II.31 Boucle d'hystérésis des références d'un gel fluidifiant	59
Fig.II.32 Différentes boucles d'hystérésis pour des modes opératoires variables.....	61
Fig.II.33 Corp. plastique thixotrope Sans contrainte du seuil	62
Fig.II.34 Corp. plastique thixotrope Modification de la contrainte de seuil.....	62
Fig.II.35 Corps épaississant thixotrope	62
Fig.II.36 Rhéomètre de type couette.....	64
Fig.II.37 Rhéomètre rotatif cylindrique	65
Fig.II.38 Rhéomètre rotatifs à cônes/plateau.....	66
Fig.II.39 Rhéomètres Type Poiseuille	68

Fig.II.40 Viscosimètre chute à bile.....	69
Fig.II.41 Rhéomètre à fluage	70
Fig.II.42 Présente les deux graphes angles de rotation $\phi=\phi(t)$ observés en-deça et au-delà du seuil d'écoulement τ_c	71
Fig.II.43 Rhéomètre plan plan en translation.....	72
Fig.II.44 Schéma du rhéomètre à plateau	73
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Liste de figures chapitre 3</u> 	
Fig.III.1. Rhéomètre HAAKE RheoStress1	75
Fig.III.2. Différentes qualités d'un rhéomètre.....	75
Fig.III.3. Constituants du rhéomètre.....	75
Fig.III.4. Méthode de mesure d'un rhéomètre	76
Fig.III.5. Quelques explications sur le logiciel	77
Fig.III.6. Exemples de représentation graphique.....	78
Fig.III.7. Méthodes d'essais typiques	78
Fig.III.8. Différents outils utilisés	79
Fig.III.9. Exemples de béchers gradués.....	79
Fig.III.10. Exemples de seringues de différentes formes graduées	79
Fig.III.11. Exemple d'une seringue de petit format	79
Fig.III.12. Exemple d'une seringue de grand format.....	79
Fig.III.13. L'eau distillée.....	79
Fig.III.14. Huile TASFALUT 40 de coupe	79
Fig.III.15. Exemples de mélangeurs utilisés.....	80
Fig.III.16. Constituants avant et après mélange.....	81
Fig.III.17. La déformation en fonction de la vitesse de cisaillement à $T= 35^{\circ}\text{C}$	81
Fig.III.18. La déformation en fonction de la vitesse de cisaillement à $T= 40^{\circ}\text{C}$	82
Fig.III.19. La déformation en fonction de la vitesse de cisaillement à $T= 60^{\circ}\text{C}$	82
Fig.III.20. La déformation en fonction de la vitesse de cisaillement à $T= 80^{\circ}\text{C}$	83
Fig.III.21.a La viscosité en fonction de la température pour 20% huile.....	84
Fig.III.21.b Les seuils en fonction de la température pour 20% huile	85

A 35°C

Fig.III.22. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5%H87
 Fig.III.23. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10 %H 87
 Fig.III.24. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 15 %H 88
 Fig.III.25. Déformation en fonction de la vitesse de rotation pour 20%H..... 89
 Fig.III.26. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 25%H 89
 Fig.III.27. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 30 %H 90
 Fig.III.28. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 35 %H 90
 Fig.III.29. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40 %H 91
 Fig.III.30. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 100 %H 91

A 40°c

Fig.III.31. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5 %H 92
 Fig.III.32. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10 %H 93
 Fig.III.33. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 15%H 93
 Fig.III.34. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20 %H 94
 Fig.III.35. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 25 %H 95
 Fig.III.36. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 30 %H 95
 Fig.III.37. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 35 %H 96
 Fig.III.38. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40 %H 96
 Fig.III.39. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement Pour 100 %H..... 97

A 60°c

Fig.III.40. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5%H 98
 Fig.III.41. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10%H 98
 Fig.III.42. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 15%H 99
 Fig.III.43. Déformation en fonction de la vitesse de rotation pour 20%H..... 99
 Fig.III.44. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 25%H 100
 Fig.III.45. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 30%H 100
 Fig.III.46. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 35%H 101

Fig.III.47. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40%H 101
 Fig.III.48. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 100%H 102

A 80°c

Fig.III.49. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5%H 102
 Fig.III.50. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10%H 103
 Fig.III.51. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 15%H 103
 Fig.III.52. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20%H 104
 Fig.III.53. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 25%H 104
 Fig.III.54. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 30%H 105
 Fig.III.55. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 35%H 105
 Fig.III.56. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40%H 106
 Fig.III.57. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 100%H 106
 Fig.III.58. La viscosité en fonction du % de l'huile à T=35°c 107
 Fig.III.59. La viscosité en fonction du % de l'huile à T=40°c 108
 Fig.III.60. La viscosité en fonction du % de l'huile à T=60°c 109
 Fig.III.61. La viscosité en fonction du % de l'huile à T=80°c 110
 Fig.III.62. La viscosité en fonction du % de l'huile à différentes températures 110
 Fig.III.63. La déformation en fonction du % de l'huile à T=35°C 111
 Fig.III.64. Les seuils en fonction du % de l'huile à T=40°C 112
 Fig.III.65. Les seuils en fonction du % de l'huile T=60°C 113
 Fig.III.66. Les seuils en fonction du % de l'huile 80°C 113
 Fig.III.67. Les seuils en fonction du % de l'huile à différentes températures 114
 Fig.III.68. La viscosité en fonction de la température pour 5% 115
 Fig.III.69. La viscosité en fonction de la température pour 10% 116
 Fig.III.70. La viscosité en fonction de la température pour 15% 116
 Fig.III.71. La viscosité en fonction de la température pour 20% 117
 Fig.III.72. La viscosité en fonction de la température pour 25% 118
 Fig.III.73. La viscosité en fonction de la température pour 25% 118
 Fig.III.74. La viscosité en fonction de la température pour 35% 119
 Fig.III.75. La viscosité en fonction de la température pour 40% 120

Fig.III.76. La viscosité en fonction de la température pour 100% 120
Fig.III.77. La viscosité en fonction de la température pour les différents %H 121
Fig.III.78. Les seuils en fonction de la température pour 5%H..... 122
Fig.III.79. Les seuils en fonction de la température pour 10%H..... 123
Fig.III.80. Les seuils en fonction de la température pour 15%H..... 123
Fig.III.81. Les seuils en fonction de la température pour 20%H..... 124
Fig.III.82. Les seuils en fonction de la température pour 25%H..... 124
Fig.III.83. Les seuils en fonction de la température pour 30%H..... 125
Fig.III.84. Les seuils en fonction de la température pour 35%H..... 126
Fig.III.85. Les seuils en fonction de la température pour 40%H..... 126
Fig.III.86. Les seuils en fonction de la température pour 100%H..... 127
Fig.III.87. Les seuils en fonction de la température pour les différents pourcentages 128

- Liste des tableaux chapitre 1

Tableau.I.1. Classification des huiles selon leur viscosité d'après ISO 3448 et NFT 60-141.....	8
Tableau.I.2. Comparaison de propriétés de différents types de fluides de coupe (+ effet positif, - effet négatif, 0 effet indifférent)	12
Tableau.I.3. Propriétés de refroidissement de l'eau et de l'huile minérale	19
Tableau.I.4. Familles d'huiles de synthèse	21
Tableau.I.5. Représente d'un cadre réglementaire applicable aux fluides de coupe...26	

- Liste des tableaux chapitre 3

Tableau.III.1. La viscosité à T= 35°C	82
Tableau.III.2. La viscosité à T= 40°C	82
Tableau.III.3. La viscosité à T= 60°C	83
Tableau.III.4. La viscosité à T= 80°C	83
Tableau.III.5. La viscosité pour différentes températures	84
Tableau.III.6. Valeurs représentantes les seuils en fonction de T température	84
Tableau.III.7. Valeurs représentantes % de l'huile en fonction du volume de l'huile.86	

A 35°c

Tableau.III.8. La viscosité pour 5%	87
Tableau.III.9. La viscosité pour 10%	88
Tableau.III.10. La viscosité pour 15%	88
Tableau.III.11. La viscosité pour 20%	89
Tableau.III.12. La viscosité pour 25%	89
Tableau.III.13. La viscosité pour 30%	90
Tableau.III.14. La viscosité pour 35%	91
Tableau.III.15. La viscosité pour 40%	91
Tableau.III.16. La viscosité pour 100%	92

A 40°C

Tableau.III.17. La viscosité pour 5%	92
Tableau.III.18. La viscosité pour 10%	93
Tableau.III.19. La viscosité pour 15%	94

Tableau.III.20.La viscosité pour 20%	94
Tableau.III.21.La viscosité pour 25%	95
Tableau.III.22.La viscosité pour 30%	96
Tableau.III.23.La viscosité pour 35%	96
Tableau.III.24.La viscosité pour 40%	97
Tableau.III.25.La viscosité pour 100%	97

A 60°c

Tableau.III.26.La viscosité pour 5%	98
Tableau.III.27.La viscosité pour 10%	98
Tableau.III.28.La viscosité pour 15%	99
Tableau.III.29.La viscosité pour 20%	99
Tableau.III.30.La viscosité pour 25%	100
Tableau.III.31.La viscosité pour 30%	100
Tableau.III.32.La viscosité pour 35%	101
Tableau.III.33.La viscosité pour 40%	101
Tableau.III.34.La viscosité pour 100%	102

A 80°c

Tableau.III.35.La viscosité pour 5%	103
Tableau.III.36.La viscosité pour 10%	103
Tableau.III.37.La viscosité pour 15%	104
Tableau.III.38.La viscosité pour 20%	104
Tableau.III.39.La viscosité pour 25%	105
Tableau.III.40.La viscosité pour 30%	105
Tableau.III.41.La viscosité pour 35%	106
Tableau.III.42.La viscosité pour 40%	106
Tableau.III.43.La viscosité pour 100%	107
Tableau.III.44.La viscosité en fonction du pourcentage de l'huile A 35°C.....	107
Tableau.III.45.La viscosité en fonction du pourcentage de l'huile A 40°C.....	108
Tableau.III.46.La viscosité en fonction du pourcentage de l'huile A 60°C.....	109
Tableau.III.47.La viscosité en fonction du pourcentage de l'huile A 80°C.....	109
Tableau.III.48.La viscosité en fonction du pourcentage à différentes températures..	110
Tableau.III.49.Les seuils en fonction du pourcentage de l'huile à 35°C	111

Tableau.III.50.Les seuils en fonction du pourcentage de l'huile à T=40°C	112
Tableau.III.51.Les seuils en fonction du pourcentage de l'huile à T=60°C	112
Tableau.III.52.Les seuils en fonction du pourcentage de l'huile A 80°C	113
Tableau.III.53.Les seuils τ_0 en fonction du pourcentage à différentes	
Températures.....	114
Tableau.III.54.La viscosité pour 5%	115
Tableau.III.55.La viscosité pour 10%	115
Tableau.III.56.La viscosité pour 15%	116
Tableau.III.57.La viscosité pour 20%	117
Tableau.III.58.La viscosité pour 25%	117
Tableau.III.59.La viscosité pour 30%	118
Tableau.III.60.La viscosité pour 35%	119
Tableau.III.61.La viscosité pour 40%	119
Tableau.III.62.La viscosité pour 100%	120
Tableau.III.63.La viscosité en fonction de la température pour tous les mélanges	121
Tableau.III.64.La viscosité pour 5%	122
Tableau.III.65.La viscosité pour 10%	122
Tableau.III.66.La viscosité pour 15%	123
Tableau.III.67.La viscosité pour 20%	124
Tableau.III.68.La viscosité pour 25%	124
Tableau.III.69.La viscosité pour 30%	125
Tableau.III.70.La viscosité pour 35%	125
Tableau.III.71.La viscosité pour 40%	126
Tableau.III.72.La viscosité pour 100%	127
Tableau.III.73.Les seuils en fonction de la température pour les différents pourcentages	
%	128

E,K: La raideur [sans unité]	M : Le couple de rotation [sans unité]
σ : La contrainte [pascal]	L : La longueur [m]
$\dot{\sigma}$: La contrainte en fonction de temps [pas.s-1]	π : Un Nombre réel =3.14...
σ_{trac} : La contrainte de traction [Pascal]	Ψ, α, φ : angles [degré]
σ_{trans} : La contrainte de transversale [pascal]	
σ_0 : La contrainte seuil [pascal]	
ε_{transv} : La déformation de transversale [pascal]	
$\dot{\varepsilon}$: La déformation en fonction du temps [pascal.s-1]	
ε_{long} : La déformation longitudinale [pascal.s-1]	
ε, τ La déformation [pascal]	
τ_0, z, τ_c : Le seuil de déformation [pascal],[N /m ²]	
ε_e : La déformation élastique [pascal]	
$\dot{\varepsilon}_V$: La déformation visqueuse [pascal]	
ε_p : La déformation plastique [pascal]	
$\dot{\varepsilon}_p$: La déformation en fonction de temps plastique [pascal.s-1]	
ν : Le Coefficient de poisson lois de Hooke	
μ : La viscosité cinématique [m ² /s]	
η, η_a : La viscosité dynamique ou apparente [Pas.S]	
η_{rel} : La viscosité relative [Pas.S]	
η_{sp} : La viscosité spécifique [m ² /s]	
[η] : la viscosité intrinsèque [m ² /s]	
η_d : La viscosité différentielle [Pas.S]	
t : Le temps [seconde]	
t_c : Le temps de charge [seconde]	
t_d : Le temps de décharge [seconde]	
$H(t)$: la fonction de Heaviside valeur 0 à t<0 ou 1 sinon	
γ, Y : La déformation de cisaillement [sans dimension]	
$\dot{\gamma}, \dot{E}, \dot{\gamma}$: la vitesse de cisaillement [s-1]	
T : La température [°C]	
g : La pesanteur 9.81 [N/KG],[m.s-2] La Gravité	
n : : L'indice de pouvoird'écoulement [sans unité]	
P : La pression [pascal]	
F : La Force [Newton]	
s : La Section [m ²]	
D : Le gradient de vitesse [s-1]	
V, v: La vitesse [m.s-1]	
V : Le volume [m ³]	
V ₀ : La vitesse initiale [m.s-1]	
h : l'épaisseur du film d'huile [m]	
U : La vitesse relative des surfaces [m.s-1]	
K : Une constante	
ρ : La masse volumique du matériau [kg /m ³]	
e : L'épaisseur[m]	
r, R : Le Rayon [m]	
ω : La vitesse de rotation [m.s-1]	
ω_0 : La vitesse de rotation angulaire [m.s-1]	

La recherche d'une productivité toujours meilleure de la coupe des métaux est donc une préoccupation majeure dans le développement de l'industrie. Chercher en permanence une amélioration, une valeur ajoutée, une astuce liée directement à l'étude approfondie des mécanismes physiques et des lois régissant ce procédé reste donc un objectif central. Son intérêt ne peut être éclipsé par le développement de nouveaux moyens d'amélioration ou de nouvelles techniques de commande et de programmation même si ces derniers points participent aussi au développement de la fabrication à grande vitesse. La mise en œuvre rationnelle de ces techniques passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le régissent.

L'étude des considérations liées aux huiles de coupe, qui font partie de la grande famille des lubrifiants, est nécessaire pour identifier et maîtriser les notions indispensables à la coupe et à la mise en œuvre du produit avec l'optimisation maximale de l'énergie, des moyens, du temps, et par la suite la productivité. Elle permet de bien définir la gamme de synthèse des huiles, et de prévoir le comportement rhéologique de l'outil lors de l'usinage, ce qui facilite par la suite la compréhension et la maîtrise des phénomènes mis en jeu dans un temps très réduit. Pour cette raison, l'industrie mécanique demande depuis de nombreuses années des outils de prédétermination des opérations d'usinage afin de dimensionner correctement leurs installations de production. Les différents paramètres de la coupe, à savoir le matériau, la forme, la géométrie et le revêtement de l'outil et les conditions de coupe influent sur l'usinabilité de la matière à usiner.

Lorsqu'une contrainte supplémentaire s'ajoute, le problème de coupe se complique. En effet, le phénomène rhéologique à l'interface Outil/Surface, usinée/Copeau est très complexe à modéliser en sachant qu'il soit la clef du comportement de l'outil, notamment sa résistance à l'usure.

C'est dans l'optique de répondre à toutes ces préoccupations que nous nous sommes proposé de mener cette étude qui traitent des questions liées au phénomène de rhéologie. En effet, notre mémoire intitulé « *L'influence de la température et du pourcentage d'huile ajouté sur les paramètres rhéologiques des huiles de coupe* » se subdivise en deux parties complémentaires : une première partie comportant deux chapitres. Le premier présente un aperçu général sur les huiles de coupe tandis que le second traite des paramètres rhéologiques intrinsèques qui influencent sur la caractérisation du mode d'écoulement tel que la viscosité

et le seuil de déformation. Aussi, il sera question d'apporter un nombre d'éclairages concernant les phénomènes physiques associés. Cette première partie représente réellement une première approche bibliographique et théorique sensée permettre une meilleure entreprise de la partie expérimentale. La deuxième partie quant à elle comporte le troisième et dernier chapitre, qui représente la partie cruciale de ce travail. Elle permettra de caractériser et de quantifier le coefficient de viscosité dynamique et la limite de déformation apparente dans les mêmes conditions de contact que celles produites aux interfaces Outil/Pièce/Copeau durant une opération d'usinage. A partir du moment où le dispositif expérimental développé est capable de fournir des informations précises sur la vitesse de cisaillement transmise de l'ascenseur vers le plan d'échantillon au cours d'essai, cette information sera utile pour différencier le comportement des différents revêtements utilisés afin d'aboutir à des observations et des mesures précises suivies par les résultats des essais réalisés en laboratoire de recherche LECMM à Mouloud Mammeri. En conclusion, nous dresserons un bilan des résultats obtenus et proposerons quelques perspectives d'étude pouvant donner suite aux travaux déjà réalisés.

- **Introduction**

Dans ce premier chapitre on s'intéresse aux lubrifiants d'une manière générale et à l'huile de coupe soluble d'une manière spécifique, d'où se dérive l'huile qu'on va analyser expérimentalement au troisième chapitre (TASFALUT 40), ainsi on va voir les moyens de Maintenance et de stockage, et finalement une étude approfondie sur les huiles usagées et les normes applicables sur ces dernières et leurs recyclage.

I. fluides de coupe : [1]

Les fluides de coupe ou de refroidissement sont utilisés dans divers procédés d'usinage pour refroidir les pièces de métal et les outils coupant et lubrifier les surfaces métalliques.

La lubrification consiste à réduire la quantité de chaleur produite par la diminution du frottement métal/métal et en facilitant l'écoulement du copeau sur l'outil. Le lubrifiant engendre des réactions physico-chimiques dans la zone de coupe, sur l'outil, sur les copeaux et la pièce usinée. Les produits de ces réactions à l'interface copeau-outil, sous forme d'une couche facilement cisailable par exemple, éviteront la soudure des surfaces, protégeront contre l'usure, diminueront le frottement et par conséquent le travail nécessaire pour enlever la matière et la chaleur générée à cette interface.

Même si les propriétés lubrifiantes du fluide de coupe influencent hypothétiquement 20% du travail mécanique fourni, en pratique, pour certaines applications, une action lubrifiante réussie peut se traduire par des gains très importants (augmentation de la durée de vie des outils, protéger l'outil, la pièce et la machine de la surchauffe et de la dilatation ainsi que de la corrosion, obtenir des dimensions précises pour la pièce réalisée et une bonne qualité de la surface usinée.

De plus, ils doivent se caractériser par une faible agressivité et toxicité envers l'homme et l'environnement, par une facilité d'application et de maintenance, une bonne comptabilité avec les lubrifiants et les graisses de machines-outils, baisse des efforts de coupe) par rapport à l'usinage à sec. En effet, la réduction du frottement sur la face de coupe de l'outil contribue de plus à la formation d'un copeau moins déformé (angle de cisaillement plus grand), à la réduction de la zone de contact et finalement à la baisse de l'énergie produite dans la zone primaire de cisaillement (zone de formation du copeau). [1]

II. Etude général sur les lubrifiants :**1) Etude statistique et économique [1]**

Les données statistiques montrent que la consommation de lubrifiants a baissé de 8,8 kg jusqu'à 5,6 kg par an par habitant entre les années 1970 et 2004. La faible augmentation de la demande en lubrifiants de 12,3% n'a pas suivi la hausse de la population mondiale de 72,5% pendant cette période.

Le déclin de la consommation volumique et la stagnation de la croissance générale du marché des lubrifiants (de 0,5 à 2% par an) ne montre pas forcément une image pertinente de la réalité. Les lubrifiants d'aujourd'hui se caractérisent par de meilleures performances qui leur apportent souvent une durée de vie plus longue qu'auparavant. La baisse de la consommation en volume a été ainsi récompensée par des revenus et des marges sur les coûts de fabrication plus importants.

Cependant, le besoin d'augmentation de la durée utile du lubrifiant n'a pas forcément pour origine la réduction des coûts de sa production, mais essentiellement la nécessité de diminuer les coûts de maintenance et de recyclage, qui ont une importance primordiale pour l'industrie.

L'utilisation globale de lubrifiants (tout compris : automobile, industrie, fluides dits de (processus, marine) se situe dans une fourchette estimée entre 37 et 40 millions de tonnes par an (en 2004 - 37,4 millions de tonnes). La fig.1 montre la distribution de la consommation mondiale de différents types de lubrifiants en pourcentages en 2004 et la position des lubrifiants industriels dans cette répartition dont les fluides de coupe font partie. Le marché des lubrifiants est un marché très contrasté et diversifié (automobile/industrie, pays "développés"/"en voie de développement"). Il se caractérise par une croissance globale lente de l'ordre de 0,5 à 2% par an, sachant que la production des lubrifiants (en volumes) est en stagnation ou décroissance dans les marchés "développés", et en croissance dans les marchés émergents. En 2005, la moitié de la consommation mondiale des lubrifiants était centralisée essentiellement sur deux continents : en Amérique du Nord et en Asie-Pacifique, Fig.1

Les tests de performance des fluides de coupe sont utilisés depuis des années pour formuler de nouveaux lubrifiants avec des composants plus performants et mieux adaptés aux applications et ainsi suivre l'évolution technologique en usinage.

Toutefois, les normes écologiques pour les lubrifiants deviennent de plus en plus contraignantes. Les règles imposées, concernant surtout la diminution de la teneur en

certaines substances chimiques nuisibles, obligent les fabricants d’huiles de coupe à développer de nouvelles formulations toujours moins toxiques.

L’ensemble des paramètres suivants : le matériau usiné, le matériau coupant et la géométrie de l’outil, les paramètres de coupe, la technique d’usinage et donc les sollicitations engendrées sur les deux faces de l’outil, constitue une configuration des facteurs qui ont un effet sur l’action et la performance du fluide de coupe. Les paramètres de coupe, essentiellement la vitesse de coupe et la géométrie de l’arête, semblent jouer un rôle primordial en termes d’accessibilité du lubrifiant aux interfaces dans les deux zones de contacts. Par conséquent, un intérêt particulier est porté dans la littérature à la vitesse de coupe dans les différents modèles d’action des fluides de coupe en usinage.

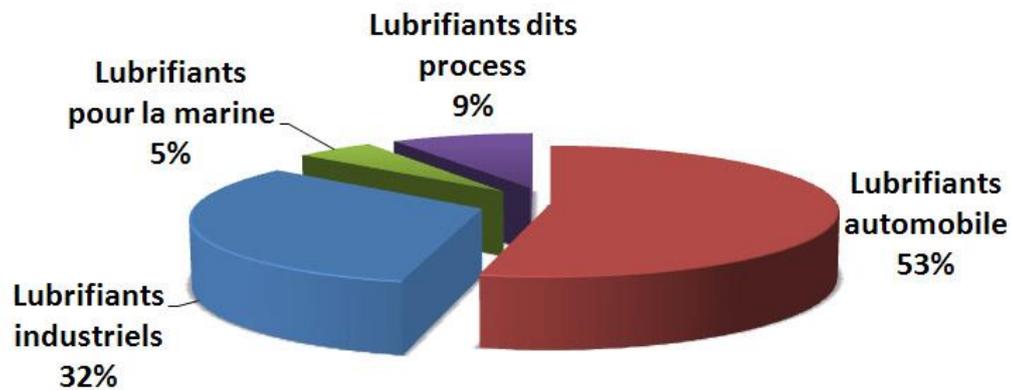


Fig.I.1 consommation mondiale de lubrifiant selon le type de lubrifiant



Fig.I.2 Répartition géographique de marché des lubrifiants en 2007

2) Les propriétés des lubrifiants : [1]

Les principales propriétés des lubrifiants, généralement indiquées dans les caractéristiques techniques du produit, sont :

la viscosité, l'indice de viscosité, le point d'écoulement, le point d'éclair.

2.1 La viscosité :

La viscosité décrit les caractéristiques d'écoulement d'un fluide. La viscosité des huiles lubrifiantes diminue quand la température augmente et doit donc être mesurée à une température donnée (p. ex. 40 °C). [2]

La viscosité d'un lubrifiant détermine l'épaisseur de la couche d'huile entre des surfaces métalliques en mouvement l'une contre l'autre.

L'unité de mesure la plus largement utilisée pour la viscosité de lubrifiant est le centistoke (cSt).

2.2 L'indice de viscosité : [2]

L'indice de viscosité est une caractéristique utilisée pour indiquer les variations de la viscosité des huiles lubrifiantes en fonction de la température.

Plus l'indice de viscosité est élevé, moins la viscosité varie en fonction de la température.

2.3 Classifications viscosimétriques : [2]

Il existe plusieurs systèmes de classification viscosimétriques indiquant généralement par un chiffre, une fourchette de viscosité plus ou moins limitée.

Cette classification a pour objectif de fournir, avec l'indice de viscosité, une indication rapide du choix de lubrifiant le plus approprié pour une application spécifique.

Les degrés ISO VG sont communément employés pour classer les huiles industrielles. Chaque degré indique un écart de viscosité cinématique mesuré à 40 °C.

Les degrés SAE sont utilisés dans le secteur des huiles pour moteurs et pour engrenages.

Classes ISO de viscosité	Viscosité cinématique médiane cSt à 40.0°C	Limites de la viscosité Cinématique cSt à 40°C	
		min	Max
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48
ISO VG 10	10	9.00	11.0
ISO VG 15	15	13.5	16.5
ISO VG 22	22	19.8	24.2
ISO VG 32	32	28.8	35.2
ISO VG 46	46	41.4	50.6
ISO VG 68	68	61.2	74.8
ISO VG 100	100	90.0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	350	1650

Tableau.I.1 Classification des huiles selon leur viscosité d'après ISO 3448 et NFT 60-141

2.4 Le point d'écoulement : [2]

Le point d'écoulement se réfère à la température la plus basse à laquelle un lubrifiant continue de s'écouler. En dessous de ce point, l'huile tend à s'épaissir et à cesser de s'écouler librement.

2.5 Le point d'éclair : [3]

Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle un mélange huile-vapeur-air devient inflammable. Il est mesuré en chauffant progressivement le mélange huile-vapeur-air dans un récipient de laboratoire standard jusqu'à ce que le mélange s'enflamme.

Remarque : Un lubrifiant a d'autres caractéristiques telles que sa stabilité chimique, son point éclair (température d'inflammation des vapeurs du fluide), son point de congélation (température à laquelle le fluide ne coule plus), solubilité etc.

3) Les additifs :

Ces différentes catégories de fluides de coupe contiennent par ailleurs de nombreux additifs destinés à leur conférer des propriétés particulières. Les huiles de coupe à base d'eau sont actuellement les plus utilisées. En effet, environ les deux tiers des fluides de coupe seraient vendus.

4) Huile de graissage :

Comme le pourcentage d'huile en poids est très élevé dans une graisse (de 75 % à 95 %), il faut une huile de haute qualité et d'un grade de viscosité propre à l'utilisation prévue. Une huile de faible viscosité convient généralement aux températures basses, aux charges faibles et aux vitesses élevées, tandis qu'une huile plus visqueuse convient généralement aux températures élevées, aux charges lourdes et aux vitesses faibles.

5) Les graisses :

La graisse est définie comme étant un produit solide ou semi solide résultant de la dispersion d'un agent épaississant dans un lubrifiant liquide. Ou ils ont ajouté à ce produit des additifs qui lui conféreront des propriétés particulières. Les principaux facteurs agissant sur les propriétés et les caractéristiques d'une graisse sont:

- Le type et la quantité de l'agent épaississant
- La viscosité et les caractéristiques physiques de l'huile
- Les additifs

5.1 Une graisse doit :

- Réduire le frottement et l'usure
- Protéger contre la corrosion
- Assurer l'étanchéité des paliers pour empêcher la pénétration d'eau et de contaminants
- Résister aux fuites, à l'égouttement et au rejet
- Résister aux changements de structure ou de consistance en cours de service
- Demeurer mobile dans les conditions où elle est appliquée
- Etre compatible avec les joints d'étanchéité
- Tolérer ou repousser l'humidité

5.2 Composition ordinaire du graisse : [2]

Agent épaississant: 5 à 20%

Huile / lubrifiant: 75 à 95%

Additifs: 0 à 15%



Fig.I.3 fluide de coupe en usinage [2]

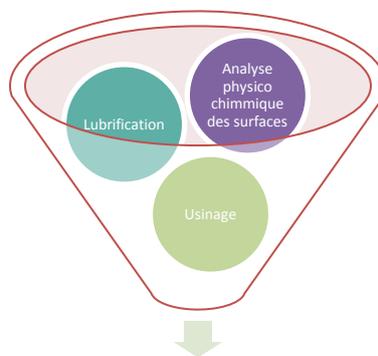


Fig.I.4 : rôle des lubrifiants et de leurs additifs dans les différentes applications d'usinage industriel [1]

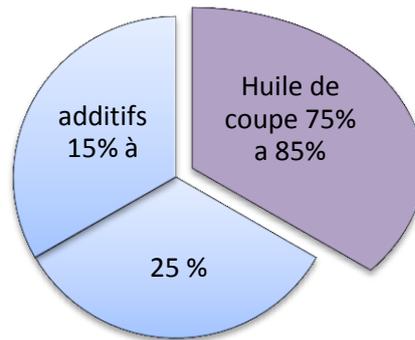


Fig.I.5 Composition générale du lubrifiant [1]

6) Classification de fluide de coupe : [3]

- ✓ les huiles de coupe entières
- ✓ les fluides de coupe à base d'eau (fluides aqueux appelés souvent émulsions).

Les huiles de coupe entières sont des produits qui ne contiennent pas d'eau. Elles se composent d'huile de base (minérale, végétale, animale ou synthétique) à laquelle on ajoute différents additifs (antioxydant, antibrouillard, anti usure (AU), extrême-pression (EP), onctuosité etc.) dans le but d'améliorer ses propriétés naturelles et de lui en conférer de nouvelles. Les bases d'origine minérale sont le plus souvent utilisées pour les huiles entières de coupe traditionnelles. Les bases d'origine végétale, pas encore bien appliquée dans les formulations traditionnelles à cause de leur stabilité thermique inférieure par rapport aux huiles minérales, sont souvent utilisées dans la micro-lubrification. Performances actuelles – besoins de futur).

Il est admis qu'un seul lubrifiant polyvalent pour toutes les applications d'usinage n'existe pas. Le choix de l'utilisation des différents fluides se fait par rapport à la fonction du fluide recherchée pour l'application donnée et à la sévérité des sollicitations envisagée. Les fluides de coupe à base d'eau ont un très grand pouvoir de réfrigération car ils contiennent de l'eau (la capacité thermique de l'eau est égale à 4,2 J/gK alors que celle de l'huile est de 1,9 J/gK). Ils sont utilisés par exemple pour les opérations à grandes vitesses de coupe où la fonction de refroidissement est prépondérante. Les huiles entières, fortement concentrées en additifs chimiques, sont utilisées dans les applications où la fonction lubrifiante permettra d'améliorer la qualité de l'usinage.

Le **Tableau 1** compare les propriétés des deux types de fluides de coupe. En fonction du matériau usiné, de l'outil coupant et des paramètres de coupe, le choix du fluide de coupe adéquat pour une application donnée peut être réalisé entre les huiles entières de coupe ou les fluides aqueux. **[1]**

	Huiles de coupe entières	Fluides de coupe Aqueux
Prix	- - -	+ + +
Coûts d'élimination	+ +	- / 0
Coûts de maintenance	+	- - -
Stabilité	+ + +	- - -
Bio stabilité	+ + +	- - -
Protection contre la corrosion	+ + +	+ +
Capacité de refroidissement	- - -	+ + +
Propriétés EP/AU	+ + +	+
Risque d'inflammabilité	- - -	+ + +
Consommation d'additifs	+ / 0	- -
Consommation d'huile	- - -	- / 0

Tableau.I.2 Comparaison de propriétés de différentes familles de fluides de coupe (+ effet positif, - effet négatif, 0 effet indifférent) [1]

7) Les différents types de fluides de coupe : [3]

Il existe trois grandes catégories de fluides de coupe:

- ✓ les huiles de coupe simples (ou non solubles),
- ✓ les huiles de coupe solubles (ou émulsifiables)
- ✓ les fluides de refroidissement synthétiques.

Les huiles de coupe simples, qui contiennent de 60 à 100% d'huile minérale paraffinique ou naphénique sont beaucoup moins utilisées depuis que leur potentiel cancérigène est reconnu. Les huiles solubles concentrées contiennent 60 à 85% d'huile

minérale. Ces huiles sont diluées dans. Les fluides synthétiques pour leur part ne contiennent pas d'huile.

III. Composition de différents types de fluide de coupes :

1) Composition générale des huiles de coupes insolubles [3]

- ✓ Base d'huile minérale (paraffinique ou naphthénique) 60% à 100% (mélange d'huile pure et d'huile grasse, huile de saindoux ou de baleine).
- ✓ Bactéricides pour prévenir la rancidité (les composés phénoliques et d'ammonium quaternaire sont utilisés comme bactéricides).
- ✓ Additifs d'extrême pression:
- ✓ le soufre, libre ou combiné à une huile ou une graisse basique: 1% à 3%
- ✓ les graisses chlorées et les huiles paraffiniques: 1 % à 3%
- ✓ les graisses sulfochlorées: 1% à 3%

2) Composition des huiles de coupe solubles ou émulsifiables [3]

Les émulsions sont produites à partir d'huiles minérales légères auxquelles on ajoute un émulsifiant qui permet la dispersion des gouttelettes d'huile dans l'eau et assure une certaine stabilité de cette forme de mélange. Dans une proportion de 5 % 10 % d'huile dans l'eau, ces huiles forment des émulsions laiteuses, tout en assurant une lubrification et une protection antirouille, ont une grande capacité calorifique.

2.1 Emulsions de fluide de coupe soluble : [4] [5]

- ✓ huile minérale: 60% à 85% du fluide concentré.
- ✓ émulsifiants (méthyl alkyl sulfonates et méthyl alkyl phénolate), savons.
- ✓ bactéricides (germicides, antiseptiques, désinfectants), par exemple acide crésylique, o-phénylphénol, tris-(hydroxyméthyl) nitrométhane; de 0.1 à 2% de la concentration habituelle.
- ✓ anticorrosion (hydroxylamine dithiophosphate de zinc alkylé ou amylé, butylphénol de méthyl, p-phénylène diamine)
- ✓ additifs d'extrême pression (phosphate de dicrésyl, dithiophosphate de zinc, paraffines chlorées, etc...)
- ✓ anti mousse, par exemple les silicones
- ✓ colorants, fluorescéine
- ✓ eau utilisé également dans l'émulsion concentrée pour dissoudre les constituants

- ✓ agents de conditionnement de l'eau, polyphosphate, phosphate trisodique, borax, carbonate de sodium, ajoutés de l'eau avant la préparation de l'émulsion. Ces fluides qui ne contiennent pas d'huile tendent à remplacer de plus en plus les huiles et émulsions conventionnelles. Etant donné leur transparence, ils permettent de suivre beaucoup plus facilement l'évolution du travail d'usinage. Ils sont utilisés principalement pour les tours à contrôle numérique ou à programmation par ordinateur.

3) Composition des fluides de refroidissement (synthétiques) [5]

Le fluide concentré est dilué avec de l'eau à des proportions variant de 1:10 à 1:200 et à un pH se situant entre 8 et 10. Ces fluides synthétiques contiennent:

- ✓ des agents anticorrosion, par exemple: hydroxylamine, nitrites inorganiques et organiques, nitrates pour stabiliser le nitrite.
- ✓ des savons et des surfactifs (oléate et stéarate de polyoxyéthylène glycol)
- ✓ des accélérateurs de mélange, par exemple; glycol (éthylène glycol, diéthylène glycol, carbinol, éthyl cellosolve)
- ✓ des bactéricides (triazine , acide crésylique , etc...)
- ✓ des agents de conditionnement de l'eau, par exemple; phosphate et borate
- ✓ des antis mousses, par exemple; silicone
- ✓ des colorants. Tous ces fluides sont utilisés dans les ateliers d'usinage, suivant le type de travail à effectuer et les caractéristiques spécifiques recherchées. Par contre, avec l'automatisation et la programmation des activités d'usinage, on utilise de plus en plus les fluides synthétiques. Nous avons, suite à des visites préliminaires et dans le cadre d'un projet-pilote dans le secteur de fabrication des produits de métal, obtenus des renseignements sur la composition générale des produits utilisés dans les ateliers d'usinage.

NB : Le fluide de coupe étudié porte le nom commercial de Tasfalut 40 et appartient à la famille d'huile de coupe soluble On s'intéresse donc à cette dernière.

IV. Huiles de coupe solubles [5]**1) Introduction au fluides de coupe solubles**

La gamme très étendue de huiles de coupe " solubles " permettra de choisir le fluide le mieux adapté à la sévérité des opérations, aux matériaux usinés et à la dureté de l'eau .Les fluides " solubles " sont tous exempts de libérateurs de formaldéhyde, de nitrites et de chlore. Ils répondent aux exigences réglementaires les plus sévères dans le domaine du travail des métaux.

Ils ont proposés également des produits formulés sans bore pour répondre aux demandes particulières de certains utilisateurs.

Ces fluides de coupe sont des liquides appliqués par arrosage pour refroidir, lubrifier la partie active des outils de machines usinant les métaux et faciliter l'évacuation des matériaux enlevés. Il peut s'agir d'opérations d'enlèvement tournage, décolletage, rectification fraisage, forage,...) ou de déformation de métaux (emboutissage, extrusion...). On distingue deux catégories principales; les huiles entières et les fluides aqueux.

Ces derniers sont préférés lorsque la propriété majeure recherchée est le refroidissement. Ils sont utilisés sous la forme d'émulsions, de microémulsions, ou de solutions vraies dans l'eau, comme on a déjà dit dans la documentation ci- dessus et le tableau suivant nous explique les propriétés de refroidissement de l'eau et de l'huile minéral.

2) Procédés d'usinage en utilisant les fluides de coupe soluble : [5]

L'usinage des pièces de métal est réalisé par enlèvement progressif de métal, afin d'obtenir la forme désirée. La plupart des procédés impliquent la formation de copeaux métalliques.

Le mouvement de l'outil coupant, ou celui de la pièce par rapport à l'outil, cause une compression dans le métal, induit une déformation à un point précis, et produit finalement le copeau. Ce phénomène est accompagné d'un dégagement de chaleur. Comme la formation du copeau cause une distorsion dans le métal, des procédés de finition sont nécessaires pour rendre la surface plus lisse.

Des fluides de coupe sont utilisés pour absorber le dégagement de chaleur produit par la coupe, afin d'augmenter la vie de l'outil et la vitesse de coupe. De plus, la distorsion du métal en est diminuée, ce qui permet un meilleur contrôle des dimensions. L'efficacité de refroidissement d'un fluide de coupe dépend de sa capacité calorifique et de sa conductivité.

L'eau pure serait un fluide efficace mais on utilise de préférence des émulsions d'huile et d'eau pour éviter la rouille des machines-outils et des pièces à usiner. Plusieurs substances chimiques sont ajoutées pour servir d'agent mouillant et d'inhibiteur de corrosion. Des huiles chlorées ou sulfurées peuvent être ajoutées pour augmenter le pouvoir lubrifiant du fluide de coupe, lors des opérations difficiles comme le filetage. Un fluide efficace peut modifier la géométrie des copeaux et donner des copeaux plus minces.

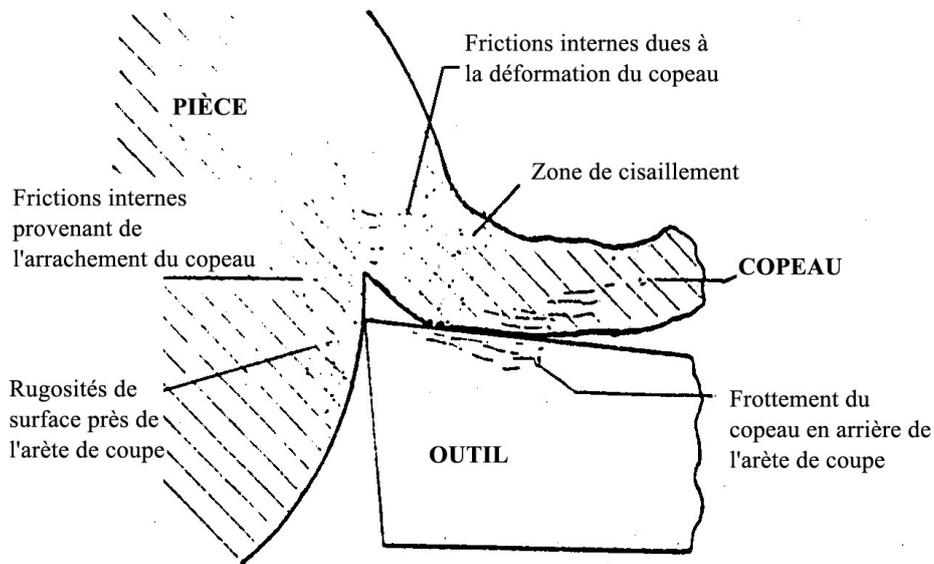


Fig.I.6 Formation du copeau lors de l'usinage [5]

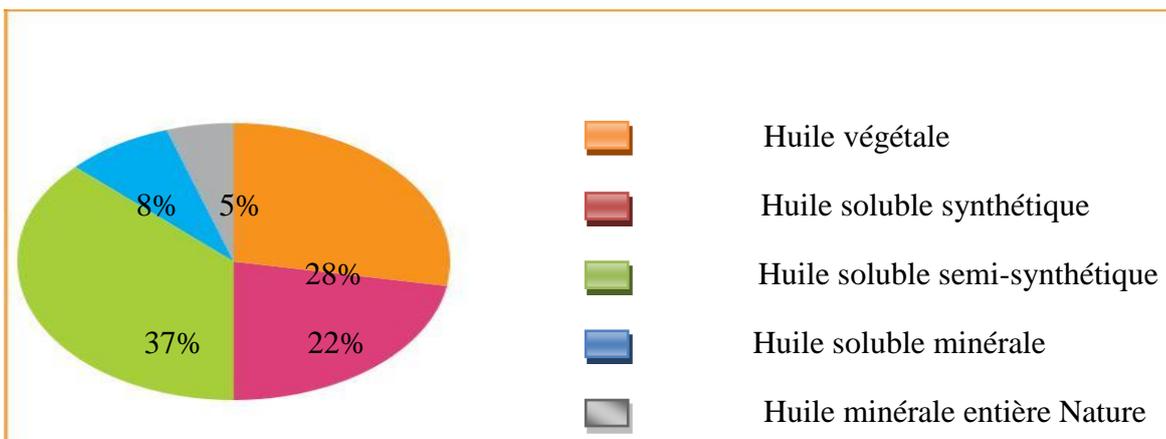


Fig.I.7 les différents types de huiles solubles [3]

3) les différents types de huiles solubles [3]

Huile végétale, Huile soluble synthétique, Huile soluble semi-synthétique, Huile soluble minérale, Huile minérale entière Nature Fig.7

3.1 Leurs avantages : [3]

- grand pouvoir de graissage et de refroidissement
- bonne protection contre la corrosion
- très résistant aux micro-organismes
- longue durée de vie de l'émulsion
- concentration d'utilisation : 5 – 20 %
- sans silicone également utilisé pour les machines à commande numérique (CNC)
- huile de coupe miscible dans l'eau (pression extrême pour une meilleure suspension de la charge)

3.2 Exemple d'une huile soluble commercialisée : [5][6]

Les huiles solubles Petrofer sont utilisées chaque fois que des conditions d'usinage difficiles nécessitent une performance élevée de lubrification et de refroidissement.

Ils ont attentivement toutes les évolutions à travers le monde concernant les changements de législations sur les produits chimiques et la santé au travail. Par conséquent leur gamme de lubrifiants est sans bore et sans formaldéhydes et répond parfaitement aux plus hautes exigences depuis de nombreuses années.

Peu importe si les produits sont émulsifiables ou solubles dans l'eau, les lubrifiants PETROFER répondent parfaitement aux exigences de la norme TGRS 611 et sont conformes à REACH. Afin d'éviter l'utilisation de matières dangereuses, la réglementation CLP est prise en compte dans le développement des lubrifiants. Au final ce sont des produits de haute performance, physiologiquement inoffensifs et optimisés en termes de santé au travail.



Fig.I.8 exemple d'un fluide de coupe commercialisé



Figure.I.9 Huile de lin soluble dans l'eau commercialisé

4) Les Huiles de coupe entières [7]

Ce type de l'huile est un fluide de coupe, à base d'huiles minérales paraffinique, développé pour les opérations courantes en usinage tel l'alésage, le fraisage, le tournage et le décolletage. Produit polyvalent, il peut s'utiliser sur métaux non ferreux, aciers doux, aciers mi-durs et la fonte. Ce dernier considérablement le coefficient de frottement indiqué par un chiffre allant de 1 000 à 9 000. Ce chiffre caractérise la capacité à lubrifier des usinages de sévérité croissante (nature des matériaux travaillés et/ou opérations d'usinage réalisées). L'huile de coupe entière permet de diminuer les coûts de production par une meilleure tenue à l'usure des outils et apporte un très bon état de surface des pièces travaillée.

4.1 Exemple VALONA :

Sont destinées aux opérations de coupe et de rectification. Respectueuses de l’environnement, elles réduisent les coûts de retraitement grâce à leur formulation sans chlore.

5) Huile de coupe minérale soluble : [5]

Pour usinage, fraisage et tournage de tous les métaux ferreux, cuivreux et aluminium.

Propriétés	Chaleur Spécifique (J / g °C)	Chaleur de vaporisation (J / g)	Conductibilité thermique (W / cm °C)
Huile minérale	1,88	283	0,00125
Eau	4,2	2257	0,0063
Rapport Eau/Huile	2	8	5

Tableau.I.3 Propriétés de refroidissement de l’eau et de l’huile minérale

5.1 Avantages [7]

- Respectueuse à l’environnement exempte d'additifs EP (Extrême Pression), chlorés et soufrés, de phénol et de nitrite.
- Permet de réaliser des émulsions laiteuses, stables et faciles à mettre en œuvre.
- Huile de coupe réfrigérante et lubrifiante.
- Protégée contre les développements bactériens et fongiques.
- Laisse un dépôt fluide protecteur sur toutes les surfaces.
- La protection contre l'oxydation est particulièrement renforcée : il n'y a aucun risque de corrosion des pièces usinées, même au stockage.
- Ne mousse pas dans les pompes haute pression. Ne gomme pas dans les glissières.
- Lubrification mécanique supérieure.
- Emulsion très fine qui accepte tout type de filtration.

6) Microémulsions semi-synthétiques : [2]

Cette gamme étendue de microémulsions a été synthétisé afin de répondre aux besoins. La polyvalence de ces fluides semi-synthétiques permettra de rationaliser les ateliers de production.

La formulation de ces produits optimise les performances de refroidissement et de lubrification pour un rendement maximum de l'outil industriel :

- formulations pour eaux douces / eaux dures
- produits extrême-pression
- produits spéciaux pour les métaux cuivreux ou les alliages d'aluminium
- produits PMUC
- produits spéciaux sans bor

6.1 Exemple d'huile IGOL semi synthétique [2]

Ce type d'émulsions IGOL ont été conçues pour les usinages les plus exigeants (aciers alliés, aluminium, titane et leurs alliages) :

- Produits extrême-pression
- Formulations pour eaux douces / eaux dures
- Produits spéciaux pour les métaux cuivreux, et pour les alliages d'aluminium
- Produits sans bore et/ou sans amine



Fig.I.10 huile de coupe synthétique en émulsions

7) Les huiles solubles synthèse : [2]

Ces huiles ont des performances élevées, en particulier pour des objectifs et des conditions de service difficiles. Cependant, elles sont chères à produire et leur disponibilité dans le monde est limitée. De plus, le choix d'un lubrifiant synthétique dépend du problème posé. Les mélanges d'huiles de base d'origines différentes sont parfois possibles, toutefois une huile dite "synthétique" doit contenir moins de 15% d'huile minérale.

Poly glycols	Bonnes propriétés lubrifiantes, point éclair élevé. Haut indice de viscosité : 150 à 200, faible volatilité, bonne stabilité thermique, incompatible avec les huiles minérales. Exemples d'utilisations : Poly glycol soluble à l'eau : fluide difficilement inflammable, fluide d'usage Poly glycol insoluble : fluide de frein, lubrifiant moteur, lubrifiant engrenage ...
Esters	Faible volatilité, bonnes propriétés à froid, bonne tenue thermique, bonne propriété solvante et bonne résistance au cisaillement. Exemples d'utilisation : graisse, turbine à gaz, aviation, utilisé comme additif (pouvoir lubrifiant élevé).
Hydrocarbures synthétiques (polyalphaoléfines)	Comportement à froid performant, indice de viscosité élevé. Selon la longueur de la chaîne, bonne propriété thermique. Exemples d'utilisations : lubrifiant d'engrenages, compresseur ...
Silicone	Inerte chimiquement, grande résistance à la chaleur et à l'oxydation. Hydrophobe, indice de viscosité élevé (jusqu'à 300), bonne propriété à froid. Incompatibilité chimique avec de nombreux additifs. Pouvoir lubrifiant très médiocre. Exemples d'utilisations : graisse, fluide hydraulique ...
Glycol	Utilisées dans les compresseurs (air, frigorifiques) pour la propreté des clapets, compatibilité avec les fluides frigorigènes, caloporteur...

Tableau.I.4 Familles d'huiles de synthèse

V. Maintenance et stockage du fluide de coupe [8]

Un bain mal préparé peut être à l'origine d'une instabilité du produit et écourte généralement la durée de vie du fluide de coupe. Un nettoyage et une désinfection des installations en contact avec le fluide doit précéder tout changement de bain.

1) Les données représentatives du produit :

Pour avoir une meilleure sécurité dans le stockage et l'utilisation des produits, il faut connaître en premier lieu les risques que représentent ces produits. Cette connaissance s'acquiert par l'obtention de données sur le (ou les) produit(s) :

1.1 Étiquetage : [8]

L'étiquette constitue la première information directement accessible à l'utilisateur. L'étiquetage a pour but essentiel de renseigner sur les risques que

peuvent présenter les produits pour l'homme et son environnement. Il indique également certaines précautions à observer pour leur stockage et leur utilisation. Il est régi par des textes réglementaires relevant principalement du code du Travail, du code de la Santé publique et des dispositions sur le transport des matières dangereuses. L'absence d'étiquetage ne signifie pas que le produit est sans danger.

1.2 Fiche de données de sécurité :

La fiche de données de sécurité est obligatoirement fournie par les fabricants, importateurs ou vendeurs de substances et préparations dangereuses. C'est la source d'information essentielle sur les produits chimiques dangereux à usage industriel. Associée à l'étude des paramètres propres aux postes de travail, elle doit permettre une bonne évaluation des risques et la mise en place de mesures de prévention au stockage, à l'emploi et à la manipulation.

1.3 Notice technique :

Elle peut contenir des données utiles à la protection des utilisateurs.

2) Quelques règles générales pour le stockage

Si les prescriptions des textes réglementaires varient selon les produits, on peut toutefois dégager un certain nombre de conditions communes que le simple bon sens peut imposer dans tous les cas. Les règles de sécurité visent à gérer l'organisation en fonction du type de stockage et du type de produits et des quantités détenues. Les produits sont stockés en réservoirs fixes ou en conteneurs mobiles selon leurs quantités et leur utilisation.

VI. Les huiles usagées

1) Caractéristiques des huiles usagées

Les huiles usagées motrices analysées à la sortie des carters contiennent un certain nombre de contaminants :

- des suies, des résines
- des métaux lourds
- des acides organiques provenant de l'oxydation partielle de l'huile
- du chlore provenant de certains additifs de lubrification
- des composés aromatiques parmi lesquels des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP)
- des phénols

- des phtalates

Les huiles industrielles noires usagées sont elles aussi très dégradées et leur contamination se rapproche de celle des huiles moteurs. Les huiles de trempe par exemple se chargent pendant leur utilisation de goudrons et de résines suite à l'oxydation importante du lubrifiant.

Enfin, les huiles industrielles claires usagées sont peu contaminées. En effet, l'eau et les particules sont en général les responsables de l'usure du lubrifiant.

1.1 Pourquoi les huiles usagées sont-elles dangereuses pour l'environnement et la santé ?

D'une manière générale, les huiles usagées sont peu biodégradables. Elles ont une densité plus faible que l'eau. C'est pourquoi 1 litre d'huile usagée peut couvrir une surface de 1000 m² d'eau et réduire l'oxygénation de la faune et la flore du milieu.

Les conséquences d'un rejet direct de l'huile usagée dans le milieu naturel sont évidentes. Par ailleurs, bien que son pouvoir calorifique puisse être estimé à environ 90% de celui du fuel lourd et fasse donc de l'huile un combustible intéressant, l'impact lié à sa combustion dans de mauvaises conditions peut être également important.

La teneur en composés aromatiques peut entraîner pour des températures de combustion trop faibles la formation d'hydrocarbures polycycliques aromatiques dont le pouvoir cancérogène a été démontré.

La présence de chlore peut entraîner la formation d'acide chlorhydrique qui sera dégagé en totalité dans l'atmosphère s'il n'y a pas de neutralisation des fumées. Par ailleurs, le chlore est susceptible de former avec les composés aromatiques une multitude de composés parmi lesquels des PCB et des dioxines (surtout en présence de phénols).

La décomposition des phtalates à trop basse température conduit à la formation d'anhydride phtalique et d'HAP (éléments toxiques et mutagènes).

1.2 Que faire des huiles usagées ?

La solution la plus simple est de faire appel à un des ramasseurs agréés pour la collecte des huiles usagées dans votre département. Ces entreprises ont pour principale obligation de se déplacer chez vous dans un délai de quinze jours suivant votre appel dès lors que vous détenez un volume d'huiles usagées au moins égal à 600 litres.

Les ramasseurs assurent une prestation d'enlèvement gratuite dans la mesure où les huiles usagées ne sont pas mélangées à d'autres déchets liquides tels que :

- liquides de refroidissement
- antigel
- solvants chlorés ou non,

- carburant
- eaux souillées
- huiles de friture etc.

En outre, les ramasseurs, soucieux de l'image de leur profession, ont engagé une démarche de certification. Ils sont pour la plupart adhérents du groupement national des ramasseurs d'huiles usagées.

Enfin, beaucoup d'entre eux cherchent à développer leur palette de services proposés aux professionnels de l'automobile en collectant d'autres déchets industriels comme les pneus, batteries, solvants, etc.

On peut aussi les remettre à un éliminateur agréé. Cette solution peut se justifier si vous détenez fréquemment de grandes quantités d'huiles usagées (par exemple, plus de 20 m³) ; dans ce cas, vous pouvez contacter un éliminateur agréé afin d'organiser des livraisons directes d'huiles usagées de votre site jusqu'à celui de l'éliminateur. Les éliminateurs doivent avoir reçu un agrément quel que soit le type d'huile usagée éliminée.

On peut aussi assurer soi-même l'élimination. Cette dernière possibilité est quasi exclusivement destinée aux industriels qui détiennent de grandes quantités d'huiles usagées et qui ont les moyens techniques d'en assurer l'élimination eux-mêmes, généralement par voie de valorisation matière. Cette solution est très contraignante car elle nécessite les autorisations préfectorales nécessaires et un agrément. A ce jour, seuls des constructeurs d'automobiles ont privilégié cette solution pour certaines de leurs unités de production et dans tous les cas pour des huiles usagées claires peu contaminées.

2) Le suivi de la collecte et de l'élimination

L'ensemble du dispositif de collecte et d'élimination donne lieu à un suivi permanent du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, grâce à des statistiques mensuelles envoyées par les ramasseurs et les éliminateurs agréés. Ainsi, l'observatoire des huiles usagées mis en place mesure au plus près l'évolution du système de collecte et de l'élimination des huiles usagées. Les travaux développés par cet observatoire ne relèvent notamment que la collecte des huiles usagées noires à plus que doublé depuis 1986 avec plus de 80 % des huiles usagées moteurs émises chaque année qui sont récupérées.

3) Risque de l'huile de coupes sur les travailleurs :

Les travailleurs spécialisés dans la transformation ou la fabrication de pièces métalliques par usinage sont exposés à divers risques mécaniques qui peuvent causer des blessures. Les chutes, sur des surfaces rendues glissantes par la projection d'huiles, à proximité de machines opérant à haute vitesse constituent un risque aux conséquences potentiellement graves.

Par contre, les principaux risques auxquels sont exposés les travailleurs des ateliers d'usinage, et dont nous allons traiter dans le présent guide, concernent la santé. Les principaux problèmes rencontrés chez ces travailleurs sont attribuables aux contacts cutanés avec les divers fluides de coupe ou à l'inhalation des brouillards qui peuvent être générés lors des opérations d'usinage. Certains produits de décomposition des huiles ainsi que les additifs qu'elles contiennent sont également susceptibles de causer des atteintes à la santé. Les contacts cutanés répétés avec les fluides de coupe peuvent causer diverses dermatoses dont la dermatite de contact (dermite orthoergique) la dermatite allergique, le bouton d'huile ("oil acne"), l'acné chlorique et la mélanose. La dermatite de contact est de loin la dermatose la plus fréquemment observée chez les travailleurs exposés aux huiles de coupe. Certaines lésions précancéreuses et cancéreuses sont également associées au contact prolongé avec les fluides de coupe; il s'agit du papillome, du kérato-acanthome et de l'épithélioma. Les hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA), et en particulier le benzopyrène, que certaines huiles contiennent en plus ou moins grande quantité, sont les principaux agents incriminés dans la genèse des cancers de la peau chez les travailleurs exposés aux huiles de coupe.

Il importe de savoir cependant que les huiles anthracéniques qui contiennent de fortes concentrations d'HPA ne sont plus utilisées. De plus, les huiles aliphatiques qui en contiennent des traces peuvent en être débarrassées par extraction de façon à réduire au maximum le risque d'exposition à ces produits. L'inhalation de brouillards d'huile peut entraîner des symptômes d'irritation des muqueuses des voies respiratoires supérieures. Des entités pathologiques telles que la pneumonie graisseuse et le paraffinome ont à l'occasion été associées à l'exposition aux brouillards d'huiles. Bien qu'il existe quelques rapports d'un excès de cancer des bronches chez certains groupes de travailleurs exposés à des brouillards d'huile, aucune relation de cause à effet n'a été démontrée jusqu'à présent. La présence de nitrosamines dans certaines huiles synthétiques constituent néanmoins un danger potentiel car on soupçonne (37/ 38) ces substances d'être cancérogènes chez l'homme/ L'objet du présent document est de proposer des éléments de surveillance médico-environnementale pour les travailleurs exposés aux fluides de coupe.

Ces propositions sont le fruit d'une revue de la littérature concernant les procédés et les produits utilisés dans les ateliers d'usinage d'une part et des risques à la santé reliés à l'exposition aux fluides de coupe d'autre part.

4) Précautions contre les risques d’huiles de coupes :

Mise à part Quelques éléments de surveillance environnementale que nous proposons. Sur le plan médical, la surveillance concerne essentiellement les effets cutanés des huiles de coupe. Il s'agit en effet de problèmes de santé bien documentés pour lesquels des activités d'information, de dépistage et d'identification des travailleurs à risque peuvent être prévues dans les programme de santé spécifiques aux établissements où les travailleurs sont exposés aux fluides de coupe. Pour ce qui est des effets pulmonaires des fluides de coupe, il pourrait être pertinent dans certains cas d'établir la prévalence et de surveiller l'incidence des symptômes d'irritation des voies respiratoires supérieures.

5) Cadre réglementaire applicable aux fluides de coupe

Déchets	Code nomenclature	Réglementation applicable
Huiles et combustibles liquides usagés	13 00 00* (déchets dangereux)	Soumis à la réglementation générale en matière de déchets dangereux Relèvent des plans d'élimination des déchets industriels spéciaux.

Tableau.I.5 Représente d’un cadre réglementaire applicable aux fluides de coupe

Le choix du fluide, le choix d’un fluide d’usinage et de ses additifs doit répondre aux exigences techniques définies par le procédé d’usinage. Toutefois, la dangerosité des composants doit être prise en compte dans le choix final. Pour ce faire, il est recommandé au chef d’entreprise de S’assurer d’être en possession de la Fiche de données de Sécurité (FDS) d’autant de moins de 3 ans et conforme au règlement REACH3, ne consulter cette FDS pour connaître la composition du produit ainsi que ses dangers et des principaux additifs entrant dans sa composition, nous consulter la fiche technique du produit pour s’assurer que le mode d’utilisation est adapté à la nature du fluide, de demander un avis au médecin du travail et à l’équipe pluridisciplinaire du SIST ou au service Prévention de la Carsat pour valider son choix. Dans le cas du choix d’un fluide aqueux, tout en tenant compte des contraintes

techniques, le chef d'entreprise devra s'assurer auprès du fournisseur que les fluides choisis : ne contiennent pas les substances chimiques suivantes :

- Diéthanolamine (amine secondaire utilisée en tant qu'additif),
- Morpholine (amine secondaire utilisée en tant qu'additif),
- Acide borique et des borates (biocide et anti corrosion),
- Formaldéhyde (biocide), n ont un pH modéré (de l'ordre de 9) pour limiter le caractère irritant de ceux-ci.

6) Récupération des huiles usagées en France [9]

6.1 Introduction

Comme la plupart des produits de consommation, les lubrifiants ont une durée de vie limitée. Les professionnels de l'automobile, les transporteurs, les industriels, les agriculteurs, les collectivités et aussi les particuliers se partagent entre 260 000 et 270 000 tonnes d'huiles usagées produites chaque année lors des opérations de vidange et d'entretien des véhicules. Les huiles usagées sont classées dans la catégorie des déchets dangereux. Face à la multiplicité et à la dispersion géographique des producteurs de ce déchet détenu en petites quantités unitaires, le législateur a, dès 1979, organisé la collecte et l'élimination des huiles usagées. Il a fixé les responsabilités des uns et des autres et décidé de la gratuité de la collecte pour le détenteur d'huiles usagées.

- La bonne gestion de cette filière répond au double enjeu :
- de la préservation de l'environnement
- des économies de matières premières ou d'énergie

De quelles huiles s'agit-il ?

6.2 Suivant les utilisations des lubrifiants neufs, on définit deux catégories d'huiles usagées :

6.2.1 Les huiles noires : elles comprennent les huiles de moteurs usagées et certaines huiles industrielles utilisées par exemple pour la trempe des métaux ou comme fluides caloporteurs.

6.2.3 Les huiles claires : elles correspondent principalement à trois catégories d'huiles neuves (hydraulique, turbine, isolante).

C'est le type de traitement que ces huiles doivent subir pour être réutilisées comme huile de base qui a conduit à cette classification. En effet, les huiles usagées noires, fortement dégradées et contaminées, doivent être raffinées à nouveau par un procédé complexe associant en général plusieurs étapes de distillation et un traitement de finition, alors que dans le cas des huiles claires, un simple traitement physique (centrifugation) peut être suffisant pour recycler

les huiles clarifiées dans des préparations lubrifiantes destinées à des utilisations peu contraignantes en termes de qualité, comme le décoffrage ou le démoulage.

6.3 conclusion

Ces huiles usagées ne doivent pas être confondues avec les huiles solubles usagées et autres fluides aqueux d'usinage, les huiles de friture, les mélanges eau / hydrocarbures pour lesquels les circuits de collecte et d'élimination sont complètement différents.

- **conclusion**

Dans ce premier chapitre descriptif nous avons mieux compris les huiles et on a enrichi nos connaissances générales sur les lubrifiants d'une façon générale.

- **Introduction :**

Dans ce deuxième chapitre on s'intéresse à la rhéologie du matériau d'une manière générale et au fluide d'une manière spécifique, aux paramètres rhéologiques intrinsèques qui influence sur le mode d'écoulement, et à l'appareillage de mesure de ces derniers.

- **La science de rhéologie :**

Le mot 'Rhéologie' inventé par le PR EUGENE COOK BINGHAM en 1929 à partir du verbe grec 'péw' (rhéos) qui veut dire couler, le professeur Reiner et le professeur Bingham, furent les fondateurs de la science de rhéologie dans le 20 e siècle. Elle Est l'étude des écoulements et des déformations de la matière, devant l'impuissance de la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides (élaborées en 19 e siècle) à décrire et a expliquer les propriétés des matériaux aux comportements mal définis. Et bien pour répandre au besoin de la technologie moderne. Les branches de la mécanique développée en XIXème siècle tel que (l'élasticité, plasticité et la mécanique de fluide) ne sont fondées que sur certains schémas simples de comportement, parfois insuffisants pour décrire fidèlement les réponses de la matière réelle.

Cela explique pourquoi, en tant que discipline, s'intéresse à un nombre important de corps tel que : Les sols (sable, bétons, boue, argile), roches (naturelles et artificiels), verres, mastics, colles, bois, peinture crèmes pharmaceutique et cosmétiques, pates, produits alimentaires, métaux et alliages, plastiques et caoutchoucs, produits pétroliers (bitumes*, asphaltes, huiles).

(*la plus longue expérience du monde (gouttes de bitume depuis 1927 jusqu'à aujourd'hui 9 gouttes sont tombées) [10] [11] [12]

I. Définition de la rhéologie :

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie la déformation des matériaux (cas des solides) ou leur écoulement (cas de liquides) sous l'effet d'une contrainte, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps.

« Une force appliquée à un corps lui fait subir une déformation .pour un solide il y aura déformation élastique si le corps revient à son état initial dès qu'on cesse d'appliquer cette force ou déformation plastique s'il revient à son état initial sous l'action d'autres forces. Pour un fluide l'action d'une force donne un écoulement. » [13]

La rhéologie se décompose en trois sortes d'études :

- 1) **Rhéologie expérimentales :** Pour déduire des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation)
- 2) **Rhéologie structurale :** pour l'Explication des comportements à partir de la structure de la matière (matériau)

- 3) **Rhéologie théorique** : pour Donner des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la microscopie de la structure.

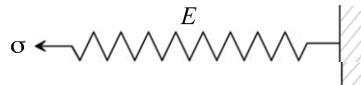
II. Etude de quelques propriétés élémentaires du comportement des matériaux :

1) Le comportement élastique

C'est le plus simple des comportements. Il est complètement réversible, c'est à dire que si les actions extérieures engendrant la déformation sont supprimées le solide retrouve sa forme initiale. Il n'y a donc pas de déformation résiduelle. Ce comportement est instantané et on le qualifie de linéaire si la mesure de la déformation est proportionnelle à la mesure des actions. La grande majorité des solides se comportent de façon élastique, au moins jusqu'à un certain niveau de contrainte. D'un point de vue physique, ce sont les forces de cohésion entre les particules matérielles (forces électriques) qui sont à l'origine du comportement élastique. [6]

1.1 Exemple 1D

Le modèle analogique 1D est celui du ressort de raideur E



FigII.1 modèle analogique 1D élastique

La relation contrainte – déformation s'écrit simplement

$$\sigma = E \varepsilon \quad .1$$

1.2 Essai uniaxial

Réalisons une expérience où l'état de contrainte est uniaxial (traction suivant Ox par exemple).Le tenseur des contraintes e donc de la forme :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad .1'$$

σ_{xx} Est ici la contrainte de traction, ε_{xx} est la déformation longitudinale et ε_{yy} , ε_{zz} sont les déformations transversales. En appliquant la loi de Hooke on a en particulier :

$$\sigma_{xx} = E \varepsilon_{xx} \quad .2 \quad \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = -\nu \varepsilon_{xx} \quad .3$$

Ce qui montre que dans un essai où l'état de contrainte est uniaxial, le module de Young E est la pente de la courbe.

$\sigma_{trac} = f(\epsilon_{long})$.4 Et le coefficient de Poisson ν est celle de la courbe $\epsilon_{transv.} = -f(\epsilon_{long.})$
 .5

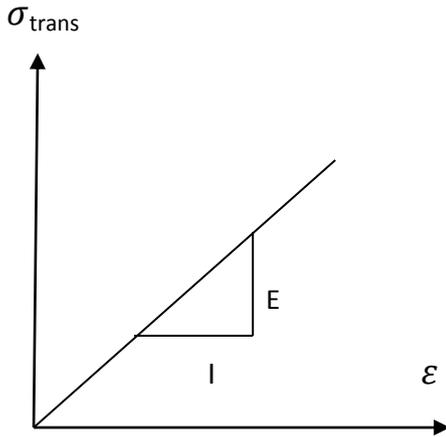


Fig.2.1

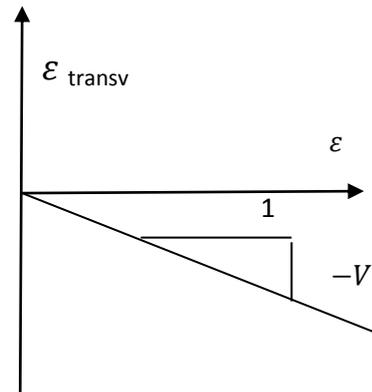


FIG 2.2

Fig.II.2 (1.2) courbe contrainte-déformation et courbe déformation transversale-déformation longitudinale pour un essai de traction uniaxial sur un matériau élastique

2) Le comportement plastique

Au-delà d'un certain seuil de contrainte (appelé seuil de plasticité ; 'yield point' en anglais), un solide commence à subir une déformation irréversible ; après déchargement complet, le corps ne retrouve donc pas la forme qu'il possédait avant la mise en charge. On ne considère ici que les déformations indépendantes du temps : le comportement du corps est toujours le même, qu'on le déforme rapidement ou lentement. Cette déformation permanente porte le nom de déformation plastique. D'un point de vue physique, les déformations plastiques peuvent être dues soit aux mouvements relatifs des grains (cas des sols) qui le constitue soit à des glissements de rangées atomiques dans le réseau cristallin (propagation de dislocations dans l'arrangement régulier du réseau). [6]

2.1. Exemple 1D

Le modèle analogique est celui du patin à frottement sec. Pour pouvoir déplacer le patin il faut vaincre la force de frottement σ_0 existante entre le patin et le plan de glissement. Une fois atteint ce seuil, le patin peut glisser. Si l'on supprime la force de traction alors que le patin glissait, il s'arrête sans bien sûr revenir à sa position initiale ; il y a donc irréversibilité.

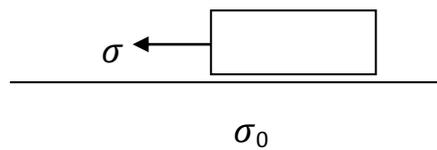


Fig.II.3 modèle analogique 1D plastique

On a donc :

$$|\sigma| < \sigma_0 \rightarrow \dot{\epsilon} = 0 \quad .6$$

(Le patin n'avance pas si le seuil n'est pas atteint)

Et :

$$\dot{\epsilon} \neq 0 \rightarrow |\sigma| = \sigma_0 \quad .7$$

(Lorsque le patin avance la contrainte ne peut dépasser le seuil), Le seuil peut aussi évoluer en fonction du glissement. On appelle *écrouissage* cette propriété. Un écrouissage négatif correspond à une chute de la contrainte durant le glissement. On qualifie les matériaux ayant ce type de comportement d'*adoucissants* et on parle d'adoucissement (*softening* en anglais). Le cas contraire (écrouissage positif) correspond aux matériaux dits *durcissant* et on parle de durcissement (*hardening* en anglais).

L'inéquation :

$$f(\sigma) = |\sigma| - \sigma_0 \leq 0 \quad .8$$

Vérifiée à tout instant par l'état de contrainte, se nomme le critère de plasticité.

3) L'élastoplasticité

Le modèle du patin précédent représente ce que l'on appelle un comportement rigide-plastique : il n'y a pas de déformation (corps rigide) tant que le seuil de plasticité n'est pas atteint ; une fois ce seuil atteint toute la déformation engendrée est irréversible. Un comportement plus réaliste pour un solide est le comportement élastoplastique : le comportement est élastique mais une déformation irréversible se développe si le seuil est atteint. [14]

3.1 Modèle 1D

Le plus simple des modèles analogiques du comportement élastoplastique est celui du patin et du ressort mis en série :

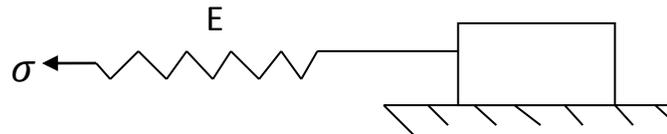


Fig.II.4 modèle analogique 1D élastoplastique

En tirant progressivement sur le ressort la contrainte augmente (le ressort se tend) et finit par atteindre le seuil. Le patin peut alors glisser de manière irréversible. La déformation totale est la somme de la déformation du ressort (déformation élastique) et du patin (déformation plastique) ; Quant à la contrainte elle reste proportionnelle à la déformation du ressort :

$$\left\{ \begin{array}{l} |\sigma| - \sigma_0 \leq 0 \\ \sigma = E \varepsilon_e \end{array} \right. \quad .8$$

$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ et $\dot{\varepsilon}_p = 0$ si $(|\sigma| - \sigma_0 < 0)$ ou $(\text{si } |\sigma| - \sigma_0 = 0 \text{ et } \dot{\sigma} \times \text{sign}(\sigma) < 0)$

4) Le comportement visqueux

On aborde maintenant les comportements pour lesquels la vitesse du chargement intervient. Intuitivement, il est clair qu'un corps réagira différemment selon la vitesse à laquelle on le déforme : sa résistance sera, par exemple, d'autant plus grande que la vitesse de déformation sera importante. On parle alors de viscosité pour désigner cette propriété du type frottement interne. La viscosité des solides est à rapprocher de celle des fluides, mais les lois de comportement sont plus complexes dans le cas des corps solides. On se limitera ici à décrire de manière élémentaire la notion de solide visqueux linéaire [6].

4.1 Modèle 1D

Le modèle analogique correspondant à un élément visqueux linéaire est celui de l'amortisseur de viscosité η

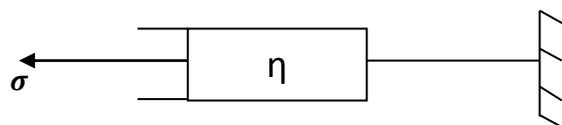


Fig.II.5 modèle analogique 1D élément visqueux

Pour pouvoir le déformer à un taux de déformation $\dot{\varepsilon}$ constant il faut lui appliquer une contrainte

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon} \quad .9$$

Plus la viscosité sera grande, plus il sera difficile de le déformer. Une viscosité infinie correspondra à un matériau indéformable.

5) La viscoélasticité : le modèle de Maxwell

De manière générale, le comportement visqueux se superpose aux comportements élastique et plastique. On parle alors de viscoélasticité, de viscoplasticité ou plus généralement de élasto-viscoplasticité. Limitons-nous à la viscoélasticité linéaire. [11]

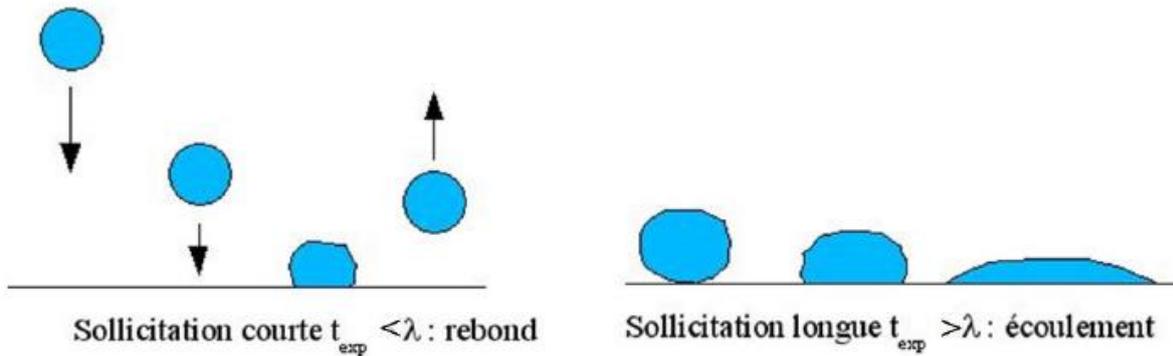


Fig.II.6 Comportement élastique et visqueux d'un échantillon viscoélastique

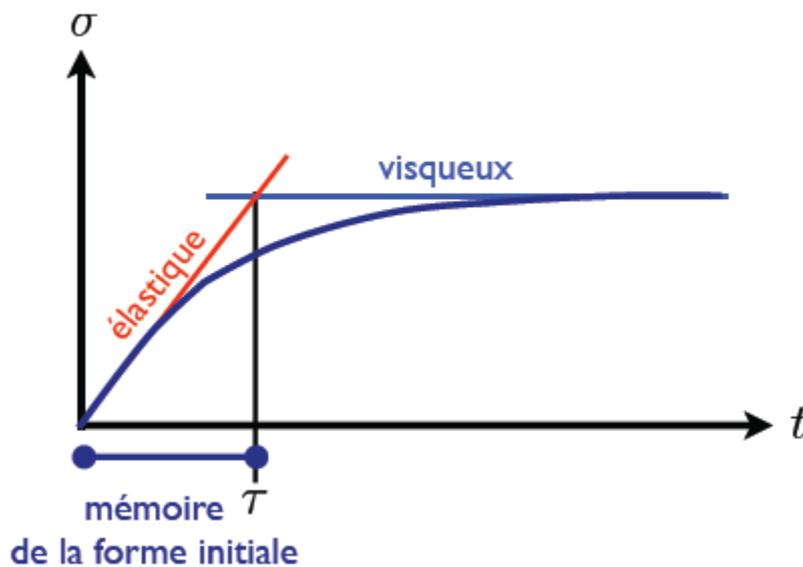


Fig.II.7 contrainte en fonction du temps

5.1 Modèles 1D

En combinant des éléments élastiques (ressorts) et des éléments visqueux (amortisseurs) on obtient divers modèles de viscoélasticité. Le plus utilisé pour décrire le comportement de la lithosphère est le modèle de *Maxwell* correspondant à un ressort et à un amortisseur placés en série.

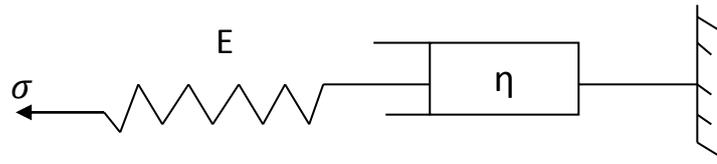


Fig.II.8 modèle analogique 1D viscoélastique

La déformation totale est la somme de la déformation du ressort (déformation élastique) et de celle de l'amortisseur (déformation visqueuse) ; quant à la contrainte elle reste proportionnelle à la déformation du ressort mais aussi à la vitesse de déformation de l'amortisseur. [13]

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v \\ \sigma = E\varepsilon_e \text{ (déformation élastique)} \\ \sigma = \eta\dot{\varepsilon}_v \text{ (déformation visqueuse)} \end{cases} \quad .10$$

On a donc

$$\sigma = E\varepsilon_e + \eta\dot{\varepsilon}_v = \dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon}_e \text{ Donc : } \dot{\sigma} = E(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_v) \quad .11$$

Et il s'ensuit que la relation de comportement peut s'écrire pour le modèle de *Maxwell*

$$\dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon} - \frac{E}{\eta} \times \sigma \quad .12$$

Pour une viscosité infinie on retrouve le modèle élastique.

5.2 Le phénomène de relaxation

Un essai de relaxation consiste à imposer à un instant donné une déformation que l'on maintient constante par la suite. On observe alors comment évolue la contrainte au cours du temps.

5.3 Explication sur un essai élémentaire

Prenons un cas plus élémentaire que l'essai réalisé afin de pouvoir faire des calculs plus simples. Considérons pour cela un essai de cisaillement simple :

$$\sigma = \begin{bmatrix} 0 & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Et imposons brusquement à l'instant $t = 0$ la valeur du glissement ϵ_{xy} que l'on maintient par la suite constante :

$$\epsilon_{xy}(t) = \epsilon_0 H(t) \quad .13$$

Où $H(t)$ est la fonction d'Heaviside valant 0 pour $t < 0$ et 1 sinon. La seule composante de la vitesse de déformation est donc donnée par

$$\dot{\epsilon}_{xy}(t) = \epsilon_0 \delta(t) \quad .14$$

Où δ est le dirac.

La loi de comportement de Maxwell permet d'écrire l'équation différentielle vérifiée par la contrainte de cisaillement.

$$\dot{\sigma}_{xy}(t) + \frac{\mu}{\eta} \sigma_{xy}(t) = 2\mu\epsilon_0 \delta(t) \quad .15$$

Si avant déformation le milieu est vierge de toute contrainte ($\sigma_{xy}(t < 0) = 0$), la solution de notre problème pour $T > 0$ est donnée par

$$\sigma_{xy}(t) = 2\mu\epsilon_0 e^{-\frac{\mu t}{\eta}} \quad .16$$

Si le milieu était parfaitement élastique ($\eta = \infty$) la contrainte aurait bien sûr été constante égale à

$$\sigma_0(t) = 2\mu\epsilon_0 \quad .17$$

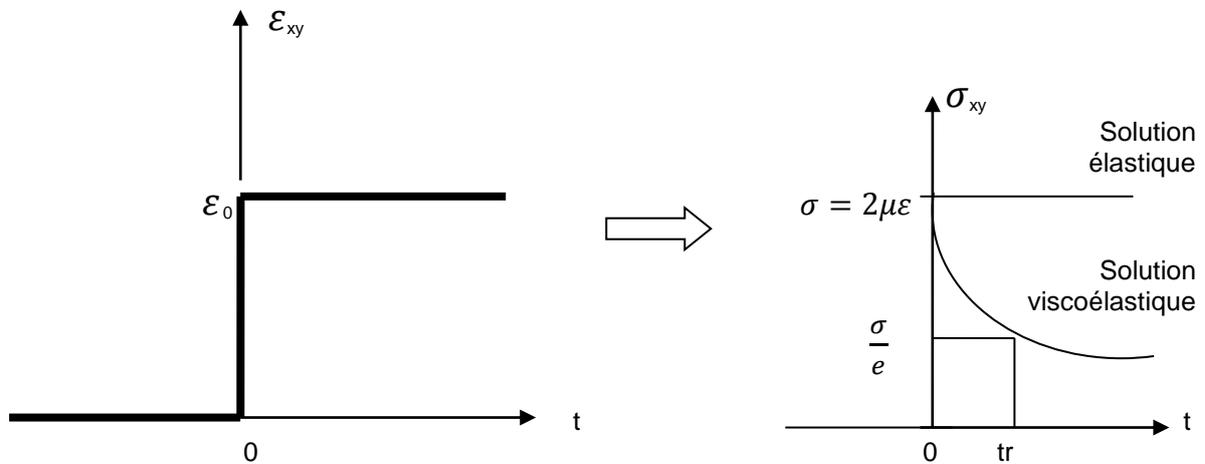


Fig.9 résultat d'un essai de relaxation en cisaillement pour le modèle rhéologique de Maxwell

Remarques :

- Il y a une réponse instantanée au chargement imposée ($\sigma_{xy}(0) = 2\mu\epsilon_0$). Elle est due à l'élasticité du matériau.
- La relaxation est totale ($\sigma_{xy}(\infty) = 0$)

- La quantité $t_r = \frac{\eta}{\mu}$ s'appelle le temps de relaxation. C'est le temps au bout duquel la contrainte a été divisée par e ($e \cong 2.71828$) rapport à sa valeur au moment de la mise en charge.

5.4 Le phénomène de fluage :

Un essai de fluage consiste à maintenir la contrainte constante et à observer l'évolution de la déformation. Pour réaliser un essai de fluage nous reprenons la géométrie de l'essai précédent et nous remplaçons les conditions aux limites en vitesse par des conditions aux limites en pression.

5.5 Explication sur un essai élémentaire :

On reprend le cas du cisaillement simple où cette fois-ci c'est la contrainte qui est maintenue constante au cours du temps, la déformation étant nulle au départ :

$$\sigma_{xy}(t) = \sigma_0 H(t) \quad .19$$

La loi de comportement de Maxwell s'écrit alors

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2\mu} \sigma_0 \delta(t) + \frac{1}{2\eta} \sigma_0 H(t) \quad .20$$

La déformation est donc pour $t = ou > 0$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2\mu} \sigma_0 + \frac{1}{2\eta} \sigma_0 t \quad .21$$

Si le milieu est élastique ($\eta = \infty$) la solution est bien sûr $\sigma_0/2\mu$.22

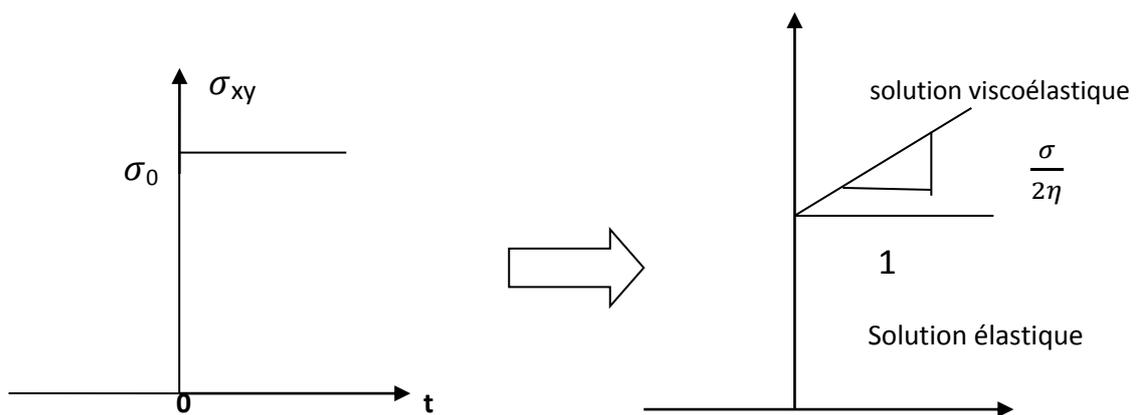


Fig.II.10 Essai de fluage en cisaillement pour le modèle rhéologique de maxwell

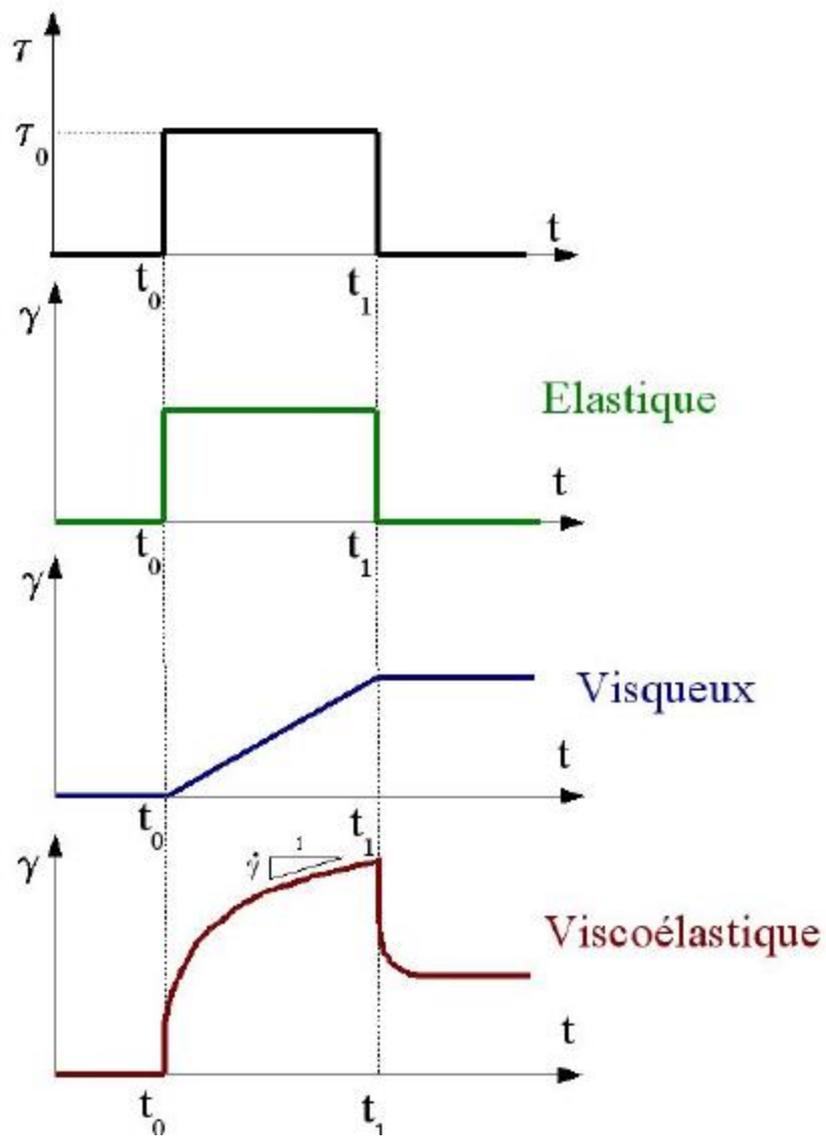


Fig.II.11 Essai de fluage (contrainte imposée) suivi de relaxation.

Remarques :

- il y a une réponse instantanée ($\epsilon_{xy}(0) = (\sigma_0)/2\eta$) Qui est due à l'élasticité.
- la déformation devient infiniment grande ($\epsilon_{xy}(\infty) = \infty$)

6) La viscoélasticité : le modèle de Kelvin – Voigt

Donnons à titre d'exemple un autre modèle de comportement aussi simple que le modèle de Maxwell mais dont les réponses aux essais de relaxation et de fluage sont très différentes. Ce modèle est celui de Kelvin – Voigt dont le modèle analogique est celui du ressort en parallèle avec l'amortisseur :

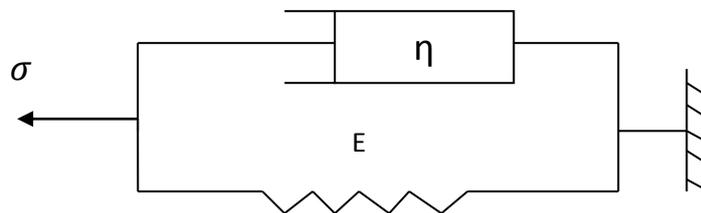


Fig.II.12 modèle analogique 1D de Kelvin – Voigt

La contrainte étant la somme de la contrainte dans chacun des deux éléments et la déformation étant celle de l'ensemble, on a

$$\sigma = E\epsilon + \eta\dot{\epsilon} \quad .23$$

6.1. Essai de relaxation

La réponse à un essai de relaxation est donnée par ($t > 0$)

$$\sigma_{xy}(t) = 2\mu\epsilon_0 + 2\eta\epsilon_0 \sigma(t) \quad .24$$

Remarquons que la contrainte est initialement infiniment grande (réponse instantanée infinie) et qu'elle vaut très rapidement la contrainte élastique ($2\eta\epsilon_0$). La viscosité n'a donc ici d'effet que sur les variations brusques.

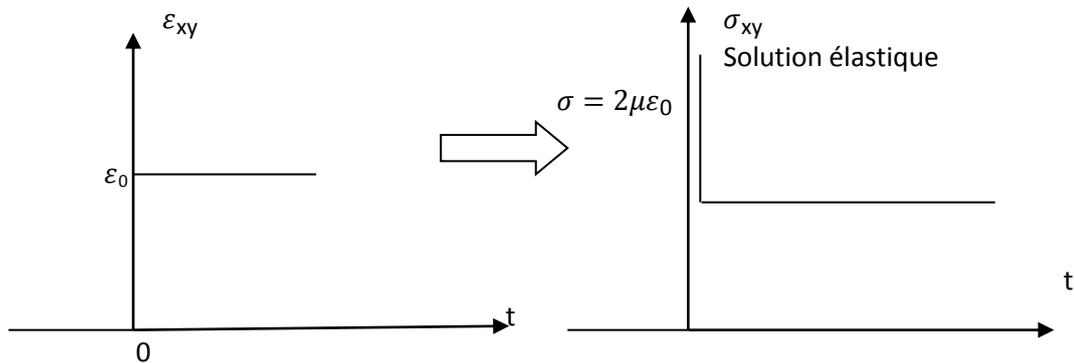


Fig.II.13 Résultat d'un essai de relaxation en cisaillement pour le modèle de Kelvin – Voigt

6.2. Essai de fluage

La réponse à un essai de fluage est ($t > 0$)

$$(\epsilon_{xy}(t) = \frac{\sigma_0}{2\mu} (1 - e^{-\frac{\mu t}{\eta}}) \quad .25$$

Il n'y a donc pas de réponse instantanée ($\epsilon_{xy}(0) = 0$) la viscosité a pour effet de « bloquer » initialement la déformation lorsque le solide est soumis à une contrainte rapide. La déformation *flue* ensuite exponentiellement mais de manière finie en tendant vers la solution élastique

$$(\epsilon_{xy}(\infty) = \sigma_0/2\eta) \quad .26$$

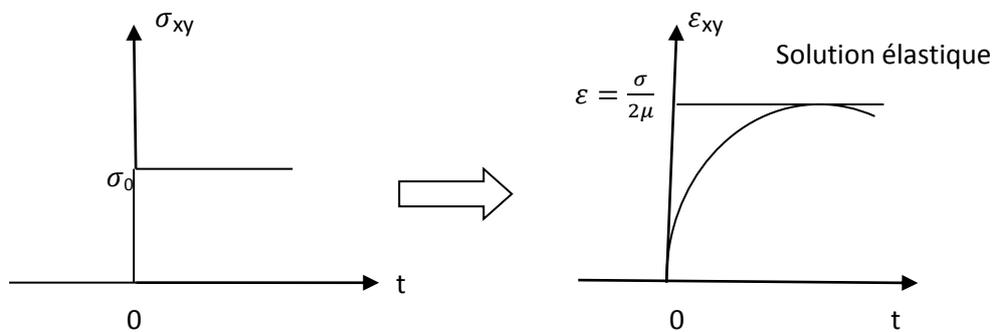


Fig.II.14 Résultat d'un essai de fluage en cisaillement pour le modèle rhéologique

III. Caractéristiques rhéologiques

1) Equation rhéologique fondamentale

Comme tout système mécanique obéit à une équation fondamentale qui établit une relation entre les grandeurs dynamique responsables de son mouvement (équation d'état).

La relation fondamentale rhéologique entre la déformation de cisaillement γ et la contrainte de cisaillement τ , est une relation qui dépend des propriétés et de la nature du matériau.[11]

$$\gamma = f(\tau) \quad .27$$

Sa connaissance détermine toutes les propriétés rhéologiques du matériau. C'est pourquoi le but de la rhéologie est la détermination expérimentale (rhéomètres) de cette équation.

1.1 Remarque :

La relation dépend aussi de la température T ET de la pression p extérieurs.

Donc il serait plus correct d'écrire :

$$\gamma = f(\tau, p, T) \quad .28$$

2) Contrainte de cisaillement :

C'est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide :

$$\tau = \frac{F}{S} \quad .29$$

Unité : pascal

3) Gradient de vitesse :

$$D = \frac{dv}{d\tau} \quad .30$$

Unité : S-1

Elle dépend de la contrainte de cisaillement appliquée et de la nature du fluide.

Au sein du fluide :

- si V_0 n'est pas trop grande, les molécules de fluide (miel) en contact avec les molécules de la paroi (aluminium) sont entraînées par lui à la vitesse V_0 , en une couche mince.
- les forces de Van der Waals permettent de transférer une partie de l'énergie cinétique de cette couche aux molécules en dessous qui sont entraînées mais à une vitesse moindre : plus ces forces d'interactions sont fortes, plus le fluide est visqueux et plus la vitesse décroît vite quand on s'éloigne de la couche du dessous.

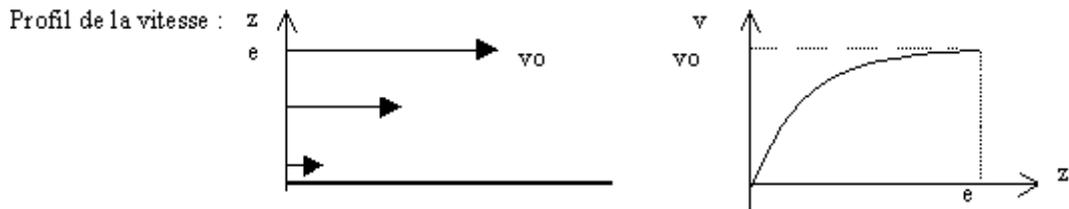


Fig.II.15 gradient de vitesse ; (déformation en fonction de la vitesse)

Le mouvement se propage en s'atténuant au sein du liquide : il est nul au contact de la plaque support qui est fixe, Le gradient de vitesse va traduire l'évolution de la vitesse au sein du fluide.

4) Déformation de cisaillement :

$$\gamma = \frac{dx}{dz} \quad .31$$

Sans dimensions,

Pour la définir, il est préférable d'envisager le cas d'une plaque à support fixe :

Considérons un petit élément de surface d'une nappe du fluide dS situé à la cote z .

A l'instant t après le début de l'expérience, elle a parcouru une distance x qui dépend de z (et de t)

A la cote $z + dz$, elle aurait parcouru $x+dx$.



Fig.II.16 déformation en fonction de la distance x ; (déformation de cisaillement)

5) Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$:

La vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ est la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement γ ;

C'est une vitesse de déformation, cette grandeur est essentiellement considérable en rhéologie, elle est identique au gradient de vitesse (dans le cas d'un mouvement laminaire plan). [11]

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad .32$$

$\dot{\gamma}$: l'inverse d'un temps en s⁻¹

Dans le cas de la symétrie plane :

$$\frac{d\dot{\gamma}}{dt} \frac{du}{dx} = \frac{d}{dx} \frac{du}{dt} \quad .33$$

On peut encore écrire :

$$\dot{\gamma}(x, t) = \frac{dv(x, t)}{dx} \quad .34$$

Parce que :

$$\frac{du}{dt} = v(x, t) \quad .35$$

$\dot{\gamma}$ est souvent désigné par la lettre D et appelée gradient de vitesse

6) Le Seuil de cisaillement :

Le seuil de cisaillement est la contrainte minimal à acquise pour que le fluide s'écoule. Elle correspond à l'énergie minimale qu'on doit apporter pour briser le potentiel d'interaction physico-chimique des particules.

7) La loi de **HERSCHELL BULKLEY** :

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad .36$$

τ_0 contrainte seuil de cisaillement en Pa ou N/m^2

8) **Rhéogrammes** :

Elles sont des courbes qui traduisent graphiquement l'équation rhéologique d'état sous l'effet de cisaillement (si la contrainte appliquée varie, il peut en son sein se déformer différemment, sa viscosité peut donc varier, donc comportement du fluide varié). Sont appelés rhéogrammes.

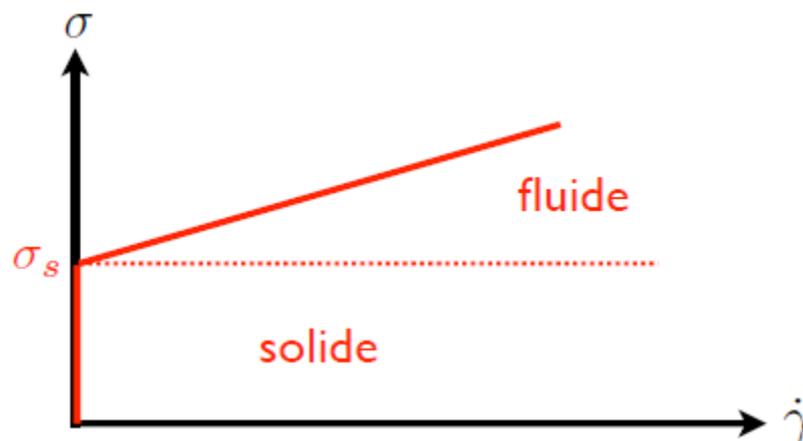


Fig.II.17 contrainte δ en fonction de vitesse de cisaillement (Fluide à seuil = δs)

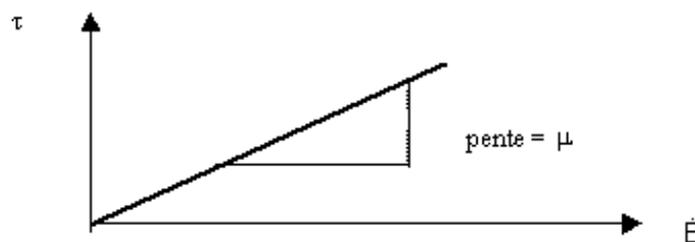


Fig.II.18 Rhéogramme cas générale gaz ou liquide pure

Les rhéogrammes les plus fréquemment utilisés sont :

- Les graphes, τ γ à pression et température extérieurs constantes ;
- Les graphes, τ , $\dot{\gamma}$ à pression et température extérieurs constantes ;
- Les graphes γ , t traduisent l'évolution de γ au cours du temps, à pression et température extérieures constantes, lorsque la contrainte est appliquée à l'instant initial $t=0$ et maintenue constante (expérience de fluage) ;
- Les graphes, τ , t, traduisant l'évolution de z au cours du temps, à pression et température initial $t=0$ et maintenue constante (expérience de relaxation) [11]

9) Viscosités :

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

Le coefficient de viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle très important en rhéologie. Ça connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du fluide. [11] [15]

On définit plusieurs coefficients de viscosité :

9.1 Viscosité dynamique (apparente) ou absolue :

η , est la vraie viscosité, exprimée en poise (p) dans le système CGS et par (pa.s) et pratiquement (miliPa .S) dans le système MKSA ou (Poiseuille 'PI')

Qui est utilisé dans le calcul d'hydrodynamique et l'élastohydrodynamique.elle est déduite de la loi de Newton ;

Avec la Relation suivante :

$$\frac{F}{s} = \eta \frac{du}{dh} \quad .37$$

Si la variation U(h) est linéaire :

$$\frac{F}{s} = \eta \frac{u}{h} \quad .38$$

F : force de cisaillement

S : surface du film

η : Coefficient de viscosité dynamique.

U : vitesse relative des surfaces

h : épaisseur du film d'huile

Dans l'expérience, lorsqu'on augmente F, en fait on augmente z on sein du fluide, lorsqu'on augmente V0 (vitesse initial), on augmente la déformation γ donc $\dot{\gamma}$ au sein du fluide. [11]

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad .39$$

η : En fonctions de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$

- Analyse dimensionnel

$$[\eta] = [m] [L]^{-1} [t]^{-1}$$

On la mesure a l'aide de viscosimètres dits « a cylindres coaxiaux » (viscosimètre de couette)

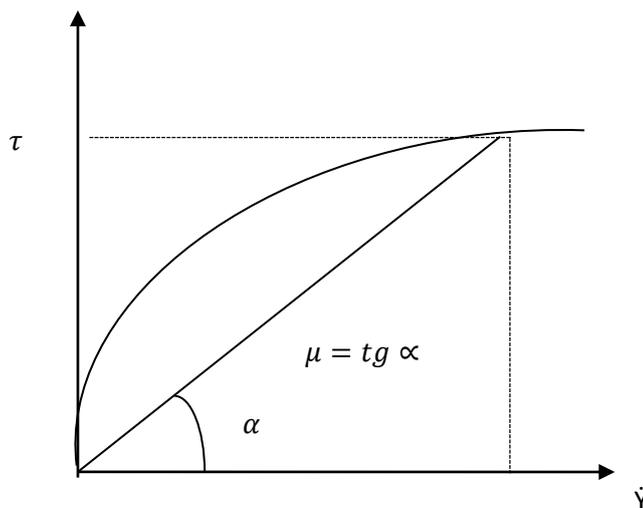


Fig.II.19.déformation en fonction de la vitesse de cisaillement dans un fluide

9.1.1 Remarque :

La viscosité dépend fortement de la pression P et de la température T extérieurs qui en doit préciser à laquelle elle a été mesurée, dépend aussi de la contrainte de cisaillement τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$.

La viscosité apparente peut varier avec la vitesse de déformation seule. Ce sera le cas avec les fluides Bingham, les fluides pseudoplastiques, les fluides rheo-épaississants, les fluides dilatants, elle peut aussi varier par le temps on les désigne par le terme générique de « fluides de Boltzmann » a cette classe appartiennent les fluides thixotropes et antithixotropes.

9.2 Viscosité cinématique :

$$v = \frac{\eta}{\rho} = K t \quad .40$$

v : m^2/s

η viscosité dynamique Pa .s

K constantes de tube

t temps d'écoulement d'huiles

ρ masse volumique du matériau kg/m^3

En pratique on détermine facilement la viscosité dynamique à partir de la viscosité cinématique donnée dans les fiches techniques des produits et de la valeur de la masse volumique donnée également, mais il faut tenir compte de la variation de cette dernière en fonction de la température.

9.3 Viscosité relative, spécifique, intrinsèque [15]

Dans l'étude des solutions, afin de déterminer les influences respectives de soluté et du solvant dans le comportement rhéologique on utilise :

9.3.1 Relative:

$$\eta_{rel} = \eta / \eta_s \quad .41$$

9.3.2 Spécifique :

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_s}{\eta_s} = \eta_{rel} - 1 \quad .42$$

9.3.3 Intrinsèque :

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{c} \quad .43$$

10) Typologie des différents modes d'écoulement :**1. Les liquides linéaires de newton**

Les fluides newtoniens sont des fluides visqueux idéaux. On les appelle aussi liquides parfaits ou liquides de Newton qui obéissent à la loi de Newton. Les huiles minérales, les mélanges d'huiles minérales sont des fluides newtoniens.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad .44$$

Ou bien : $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \text{cte}$

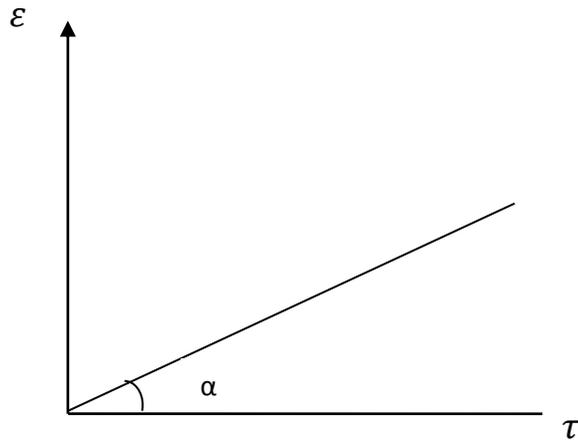
η : coefficient de la Viscosité

$\dot{\gamma}$: dérivé /au temps de la déformation

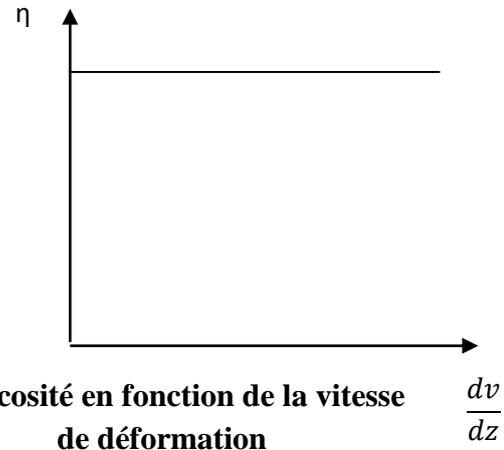
τ : Contrainte de cisaillement

La viscosité est donc indépendante de τ , de la dérivé /au temps de la déformation $\dot{\gamma}$ tant que le régime est laminaire. C'est une équation différentielle linéaire à coefficients constants par conséquent le liquide de Newton est le seul liquide linéaire.

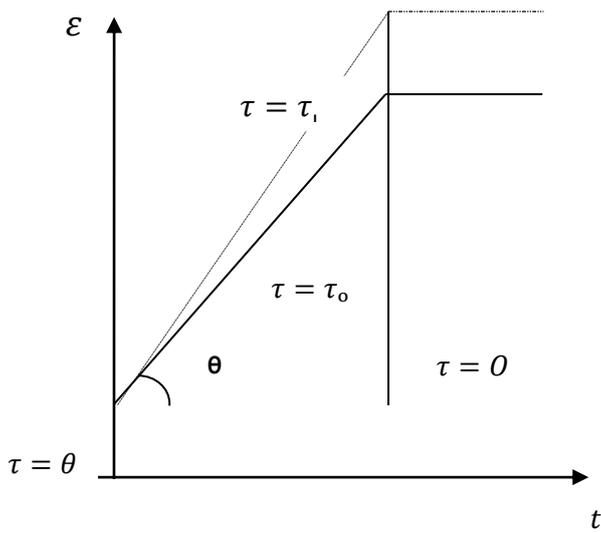
$$\theta \operatorname{tg} = \frac{dv}{dz} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$



b) Rhéogramme



c) Viscosité en fonction de la vitesse de déformation



a) Courbe de fluage

Fig.II.20 a, b, c Fluides Newtoniens.

La vitesse de déformation est donnée par la pente de la droite représentant la fonction $Y=f(t)$, elle est proportionnelle à la tension de cisaillement appliqué :

$$d\varepsilon/dt = tg\theta = dv/dz = 1/\eta \quad .45$$

Fig.20.b le rhéogramme donnant la vitesse de déformation $\frac{dv}{dz} = \frac{dY}{dt}$ en fonction de la tension de cisaillement τ

Pour un cisaillement donné :

$$\tau = \eta \frac{dY}{dt} \quad .46$$

Dans ce diagramme un fluide newtonien se représente par une droite passant par l'origine. la pente de celle-ci est $tg\alpha$ et l'on a l'équation :

$$\eta = \cotg \alpha = K \quad .47$$

Fig.20.c un diagramme donnant la viscosité absolue dynamique en fonction de la vitesse de déformation

Dans ce cas $\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dz}} = K$ est représenté par une droite horizontale

Pour déterminer les propriétés d'un fluide newtonien à une température et pression déterminé, une seule mesure suffit, cependant beaucoup de fluides lubrifiants n'obéissent pas à la loi simple de Newton. [18]

2. Les fluides pascaliens

Pascal a traité des fluides comme s'ils étaient sans viscosité et sans compressibilité. Pour lui une pression appliquée en un point d'un liquide se transmet intégralement et instantanément en chaque point de ce fluide. Il est évident que le comportement général des fluides de graissage est loin du comportement idéal de fluide de Pascal. Les pressions auxquelles ils sont soumis modifient leur propriétés et lorsqu'ils se trouvent placés entre deux solides en mouvement relatif leur viscosité joue un rôle important. de ce point de vue leur comportement peut être très varié.

3. Les fluides non linéaires ou non Newtoniens :

Beaucoup de fluide n'obéissent pas à la loi de Newton. Nous allons ici après avoir évoqué les conceptions de Pascal en ce domaine, rappeler les types de Fluides les plus importants en lubrification tel que :

Les fluides newtoniens et non newtoniens.

Parmi les fluides non newtoniens on considère ceux ou les propriétés d'écoulement se trouvent liées à la vitesse de déformation tel que :

Les fluides 'binghamiens', fluides pseudoplastiques, fluides rheo-épaississants et fluides des dilatants et ceux ou le temps de cisaillement modifie les propriétés d'écoulement : fluides thixotropes et fluides antithixotropes. ces derniers constituent les fluides de Boltzmann.

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

Dans ces conditions, on ne peut plus définir une viscosité absolue, on parle donc de viscosité apparente pour τ ou $\dot{\gamma}$ donné :

$$\eta = \left(\frac{\tau}{\dot{\gamma}}\right)_{(\tau=\tau_0)} \quad .48$$

Le choix arbitraire de τ_0 signifie qu'un fluide non Newtonien n'est pas caractérisé par sa viscosité apparente mais par l'ensemble de son rhéogramme

3.1 Les corps plastiques de BINGHAM :

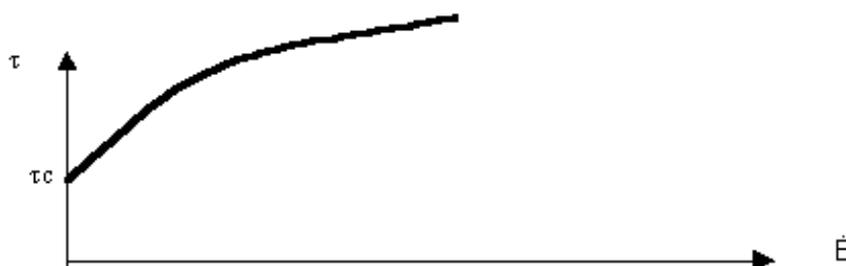


Fig.II.21 la déformation en fonction de la vitesse de cisaillement à partir de seuil

(Substance plastique de Bingham)

Les substances plastiques de Bingham se caractérisent par le fait qu'elles n'accusent pas d'écoulement tant que la tension de cisaillement qu'on leur applique reste inférieure à une valeur seuil τ_c ou τ_0 appelée 'seuil de déformabilité' 'yeld value' en anglais.

Dès que la tension de cisaillement dépasse cette valeur, il se produit un écoulement avec une vitesse de déformation proportionnelle à l'accroissement de la tension de cisaillement. il peut se caractériser par les diagrammes suivants :

-un diagramme fig.22.b donnant la déformation Y en fonction du temps t.

On constate que pour $t \tau < \tau_c$, on a une déformation élastique. Cette déformation est indépendante du temps et disparaît à la disparition de τ .

Quand $\tau > \tau_c$, il se produit un écoulement, la déformation devient une fonction linéaire du temps :

$$\frac{dY}{dt} = cte = tg \Phi \quad .49$$

Quand la tension de cisaillement est alors annulée, la déformation du fluide due à l'écoulement cesse et elle régresse même de la quantité due à l'élasticité.

On peut tracer un rhéogramme pour ce type de corps. $dv/dt = f(\tau)$ [18]

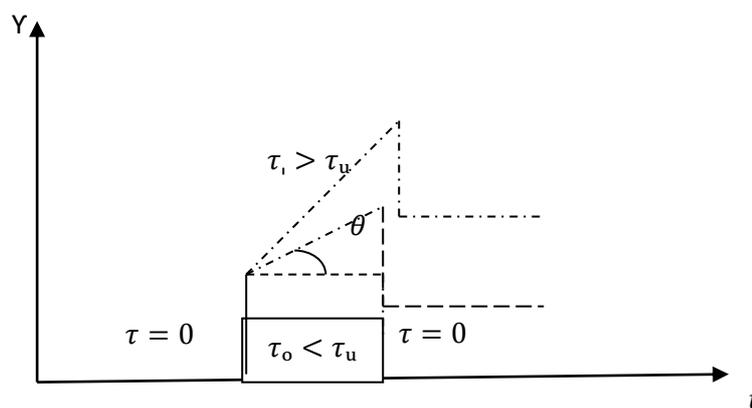


Fig.II.22.a Courbe de déformation et de fluage en fonction de t

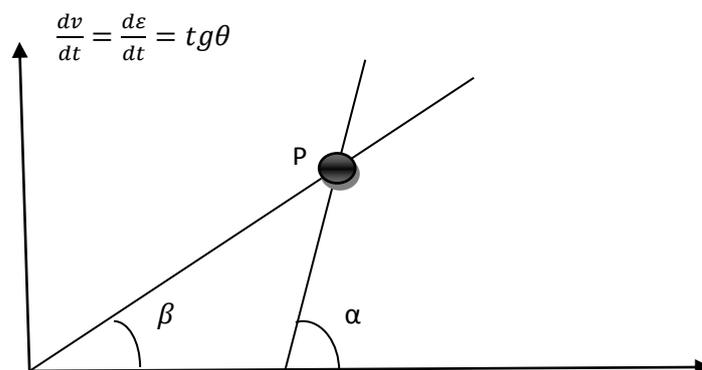


Fig.II.22.b Rhéogramme $\frac{dv}{dt} = f(\tau)$

Pour $\tau_0 < \tau_c$, $dv/dz = 0$ la vitesse de déformation est nulle.

Pour $\tau_1 > \tau_c$ la vitesse de déformation augmente linéairement avec la tension de cisaillement

La courbe en pointillé est la courbe réelle.

Sur le rhéogramme le point P correspond à une valeur commune de τ et dv/dz

On définit à ce lieu le coefficient de viscosité apparente $\eta = \cotg \beta$

$$\eta = \tau / \frac{dv}{dz} \quad .50$$

Et le coefficient de viscosité différentielle

$$\eta_d = d\tau/d(dv/dz) \quad .51$$

Pour les corps de Bingham le coefficient de viscosité différentielle η_d est une constante

$$\eta_d = \cotg \alpha \quad .52$$

Les graisses lubrifiantes ayant des propriétés assez voisines des fluides de Bingham,

Mais en réalité il n'y a pas de corps de Bingham idéaux. [18]

3.2 Les fluides pseudoplastiques (shear softening thinning):

Appelé aussi fluides rhéofluidifiants, les fluides pseudoplastiques.

3.2.1 Définition :

Ensemble de tous les corps dont les rhéogrammes sont des courbes passant par l'origine fig.23 et dont la concavité est tournée vers le bas fig.24 Si bien que le coefficient de viscosité n'est pas constante mais diminue avec le cisaillement fig.24 Ce type de comportement est le plus fréquent ,concerne les dispersions de particules asymétriques, les pâtes à papier, les colles, les cimentsson interprétation moléculaire la plus simple consiste à admettre que les molécules ou les unités structurales s'alignent progressivement dans le sens de l'écoulement au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement augmente, favorisant ainsi l'écoulement des différentes couches de liquide. Une autre interprétation moléculaire consiste à envisager une modification de structure de liquide (déstructuration par rupture de liaisons ou défloculations de particules) en fonction de la vitesse de cisaillement. [11]

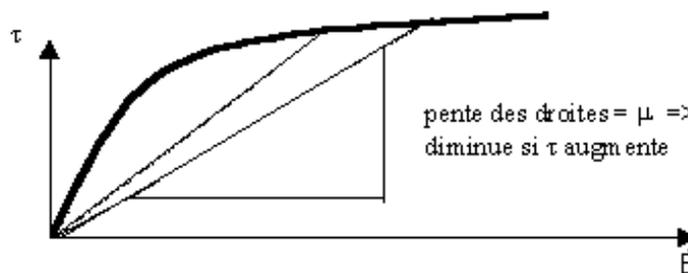


Fig.II.23 déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour un Corp. rhéofluidifiant

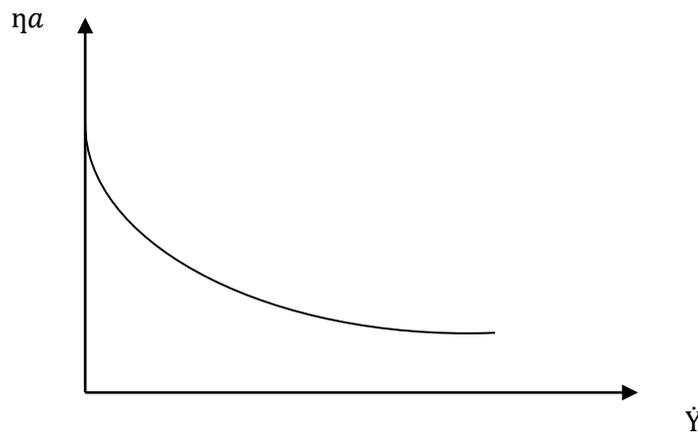


Fig.II.24 Variation de la fluidité apparente d'un corps fluidifiant en fonction de la vitesse du cisaillement

Fig.23 et Fig.24 ont un coefficient de viscosité ηa diminuant quand la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$ augmente, mais pas de seuil de déformabilité (loi d'Ostwald en 1992 *) On dit qu'ils possèdent la propriété de *rhéofluidification*.

On pourrait encore en ce cas exprimer $\dot{\gamma}$ en fonction de temps pour différentes valeurs de τ on aurait des droites passant par l'origine, la vitesse de déformation étant constante pour une tension de cisaillement donnée par contre dans le rhéogramme ou est portée la vitesse de déformation en fonction de la déformation, on a plus une droite. la vitesse de déformation augmente plus vite que la tension du cisaillement et l'on obtient des deux types de courbes représentées sur la fig.25, Lorsque la courbe est tracée jusqu'aux grandes vitesses de déformation, la courbe s'apparente le plus souvent à la figure 25B que 25a.

Dans ce cas, on définit pour un point P de coordonnées τ et dv/dz un coefficient de viscosité apparente $\eta a = \tau / (dv/dz) = \cotg \alpha$, La viscosité apparente diminue quand τ et dv/dz augmente. Un coefficient de viscosité différentielle $\eta d = d\tau / d(dv/DZ)$ qui est le rapport de l'accroissement de la tension de cisaillement à la croissance dv/dz il correspond à $\cotg \alpha_i$.

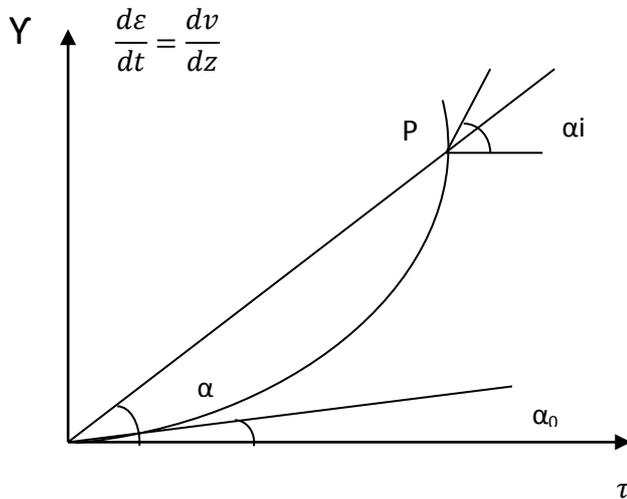


Fig.II.25.a Courbe de fluage

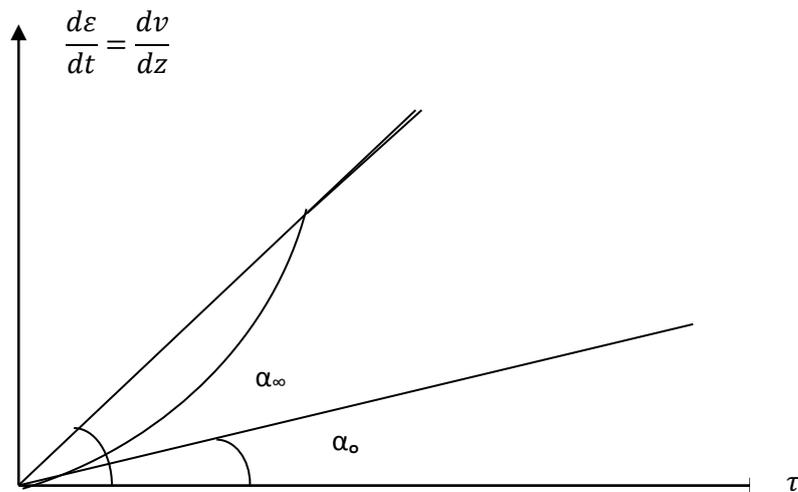


Fig.II.25.b Rhéogramme vitesse de cisaillement en fonction de déformation

Il diminue aussi quand τ augmente et tend finalement vers la valeur limite de $\cot g \alpha_{\infty}$ Pour τ_{∞}

Les courbes donnant la viscosité apparente η_a / dz , montrent que η_a tend vers une valeur limite fig20C

***La loi d'Ostwald-de Waele ou loi en puissance est une loi de puissance définissant les fluides sans seuil. Elle relie la contrainte de cisaillement au taux de cisaillement.**

La loi d'Ostwald-de Waele est un modèle mathématique simple permettant de modéliser facilement un fluide non-newtonien sans seuil en reliant la contrainte de cisaillement τ au taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) :

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad .53$$

K : est une constante : l'indice de consistance ;

n : un nombre sans dimension : l'indice d'écoulement.

La viscosité dynamique apparente est alors donnée par :

$$\eta_a = \tau / \dot{\gamma} = k \dot{\gamma}^{n-1}. \quad .54$$

Ainsi, si :

- $0 < n < 1$, le fluide est rhéofluidifiant ou pseudoplastique ;
- $n = 1$, il est newtonien ;
- $n > 1$, il est rhéoépaississant ou dilatant. [10]

3.3 Les fluides rheo-epaississants et dilatante

Certain fluides peuvent s'épaissir au cisaillement : ils sont qualifiés de la rheo-epaississants .les cas rencontrés, beaucoup plus rares que les précédentes correspondent à des suspensions de l'arrangement des particules et perturbés par le mouvement (Metzner ET WHITLOCK) .il en résulte une augmentation de frottement entre couches.

Ceci s'accompagne souvent d'une légère augmentation de volume particulièrement s'il existe des espaces vides entre particules, d'où le nom de « dilatants » donné parfois à ce type de fluide.il n'y a pas nécessairement de la relation entre les variations des propriétés (d'écoulement rhéo-epaissiment) et les accroissement de volume (dilatance provoquée par les déplacements de liquide).

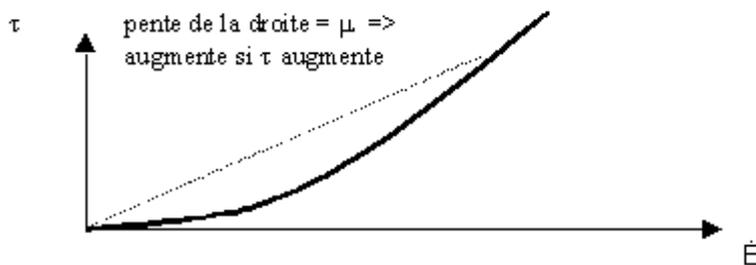


Fig.II26.Rhéogramme de fluide rho-epaississants

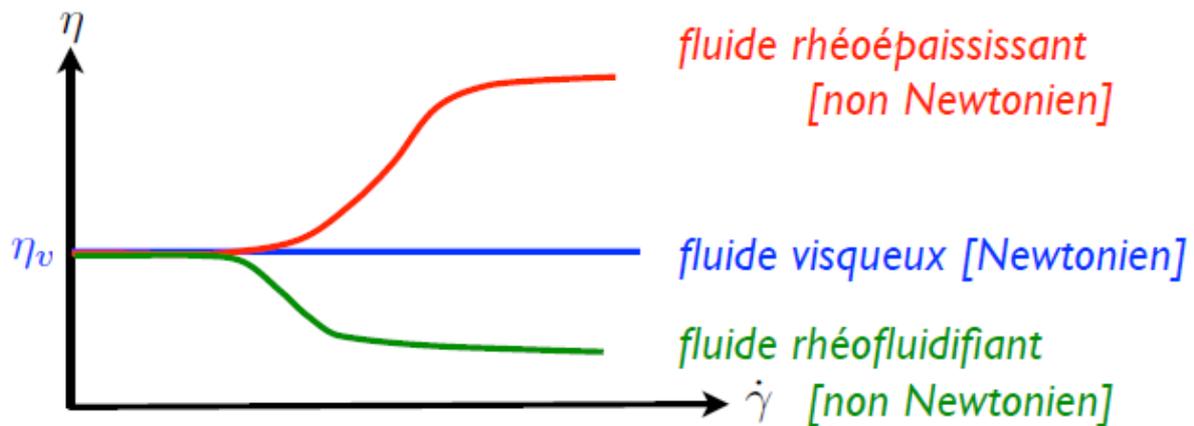


Fig.II.27. La viscosité dynamique en fonction de la vitesse de cisaillement pour différents fluides

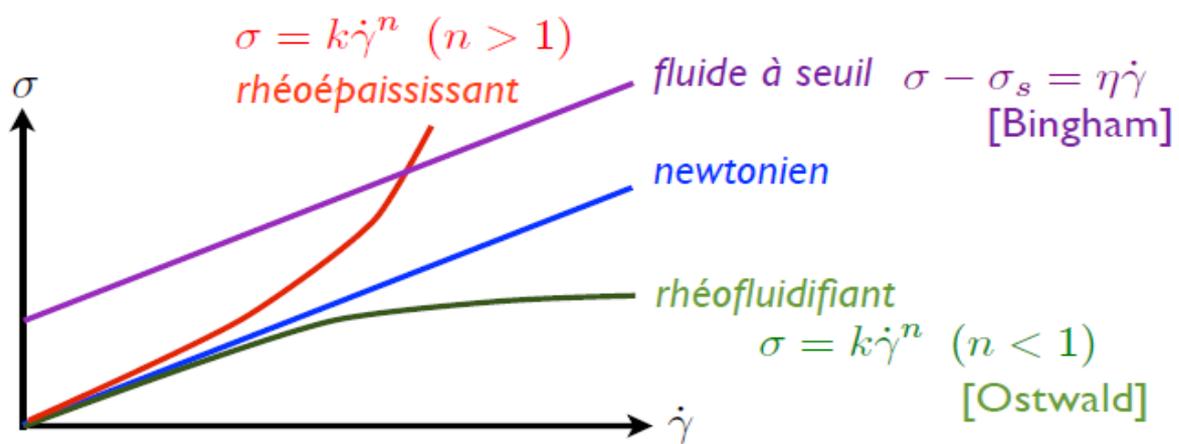


Fig.II.28 Les 4 grands types d'écoulement

3.4 Les fluides de BOLTZMANN

Certains fluides non newtoniens subissent une variation de leurs propriétés d'écoulement en fonction de temps de cisaillement auquel ils sont soumis. Leur comportement dépend de l'historique des contraintes qu'ils ont subies. Ils correspondent au fluide de BOLTZMANN. On y distingue essentiellement les fluides thixotropes et les fluides antithixotropes. [12] [17]

11) Variation du comportement rhéologique d'écoulement du liquide avec le temps

1. Les fluides thixotropes :

Une substance est dite thixotrope quand sa viscosité diminue avec le temps de cisaillement. Ceci s'explique par une modification, une destruction partielle de la

structure des fluides. Après un temps de repos suffisant, la viscosité se rétablit progressivement et sa structure initiale se régénère fig.27

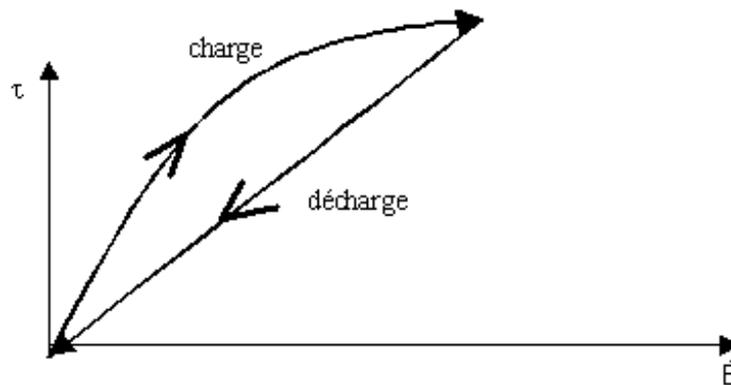


Fig.II.29 Cycle d'hystérésis d'un fluide pseudoplastique

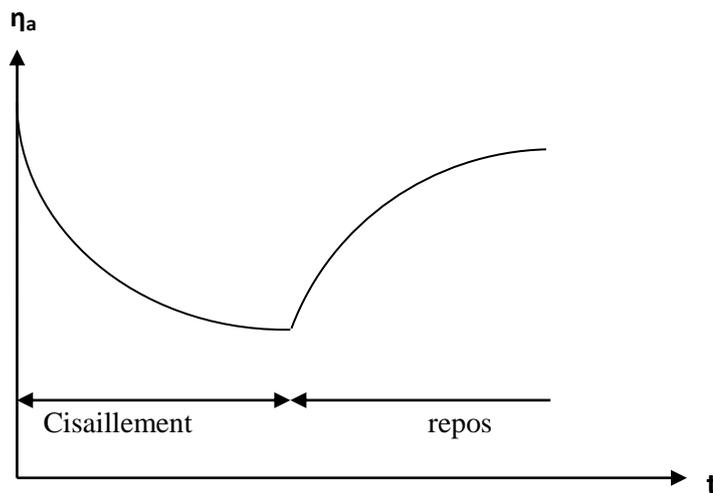


Fig.II.30 Viscosité apparente en fonction du temps à vitesse de cisaillement constante

Les substances plastiques, les graisses sont des fluides thixotropes, de même fuels lourdes, les asphaltes. Les fluides thixotropes présentent un phénomène d'hystérésis mise en évidence dans le diagramme vitesse de déformations en fonction de la tension de cisaillement c à d que la courbe de monté en cisaillement ne coïncide pas avec la courbe descente fig26.

Après un temps de cisaillement assez long, la substance cisailée a une vitesse de déformation plus grande pour une valeur donnée de la tension de cisaillement. Le phénomène peut être réversible, parfois il ne l'est pas, les structures détruites ne se refont pas spontanément t. on parle alors de fausse thixotropie. Ainsi certain aditifs de viscosité des huiles sont sensible au cisaillement. Un fort cisaillement provoque une perte de viscosité définitive de l'huile ou ils sont mis en solution.

Certain liquide peuvent avoir un écoulement dont les caractéristique dépendent des traitements antérieurs, dont la viscosité n'est plus fixée pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de déformation, mais dépend également d'un autre paramètre 'le temps' dans ces conditions, le mode expérimental adopté pour tracer des courbes d'écoulement revêt une grande importance. Quand on effectue la détermination point par point d'un rhéogramme, on peut envisager trois procédés différents :

Faire des mesures τ et $\dot{\gamma}$ dans une chronologie quelconque

Procéder par valeurs croissantes de τ ou $\dot{\gamma}$

Procéder par valeurs décroissantes de τ et $\dot{\gamma}$

Le premier est difficile et non utilisable car il fournit des courbes peu interprétables, les deux autres le sont et ne sont pas toujours comparables

On peut très bien établir ces courbes par valeurs croissantes ou décroissantes de τ ou $\dot{\gamma}$ et quelle que soit la durée expérimentale. il n'en est pas de même de tous les corps : certains ne présentent pas de l'hystérésis (on obtient la même courbe quand on varie le temps) il faudrait tracer des rhéogramme a trois dimensions en ajoutant une variable temporelle. On se contente le plus souvent d'une information partielle en procédant de la façon suivante : on effectue une expérience de charge (cisaillement croissant) suivie d'une décharge (cisaillement décroissant), et on trace dans un même système d'axes les deux rhéogramme correspondants de la manière habituelle. On obtient deux courbes : la courbe de retour ne coïncidant pas avec celle d'aller. On dit quand a tracé une courbe d'hystérésis exp présentant de gel fluidifiant présentant de l'hystérésis [11] [18]

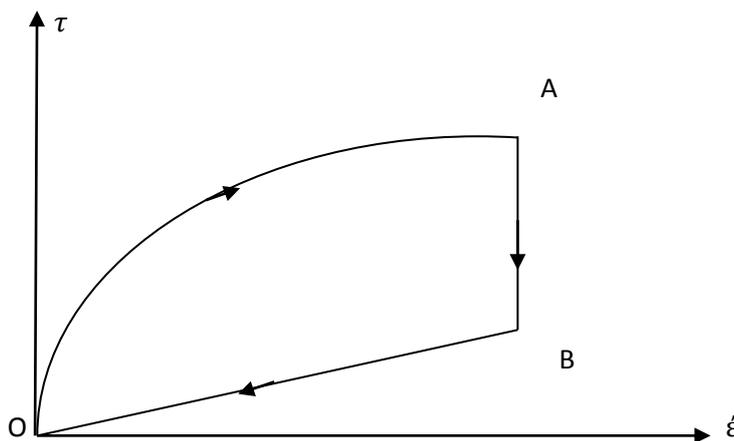


Fig.II.31 Boucle d'hystérésis des références d'un gel fluidifiant

On fait des mesures par valeurs croissantes de τ ou $\dot{\gamma}$ a des intervalles de temps très courtes de telle manière que le temps total de la charge tc reste petit devant toute les autres

durées expérimentales, et aussi devant le temps propres à la structure étudiée dans ces possibilités d'évolutions à contrainte ou à vitesse de déformation constante.

On laisse le corps sous cisaillement maximal pendant un temps t_a jusqu'à ce que les propriétés rhéologiques n'évoluent plus, puis on fait décroître τ ou $\dot{\gamma}$ pour des mesures en décharge pendant un temps total td .

Nous obtiendrons donc une courbe ayant l'allure illustré par la fig28, que nous nommerons courbe de référence.

La partie OA de la courbe est caractéristique du comportement fluidifiant pendant le temps d'attente t_a sous cisaillement maximal, la viscosité apparente diminue progressivement, ce qui correspond à un changement de structure c'est la transformation de l'état de gel à l'état fluide .en B, la structure étant complètement détruite, on garde une viscosité constante pendant toute la décharge, d'où le retour linéaire. [11] [18]

Si on effectue l'expérience dans des conditions de temps différentes, on peut avoir des effets distincts décrits par les segments OA AB BO (courbes d'hystérésis ayant différentes allures)

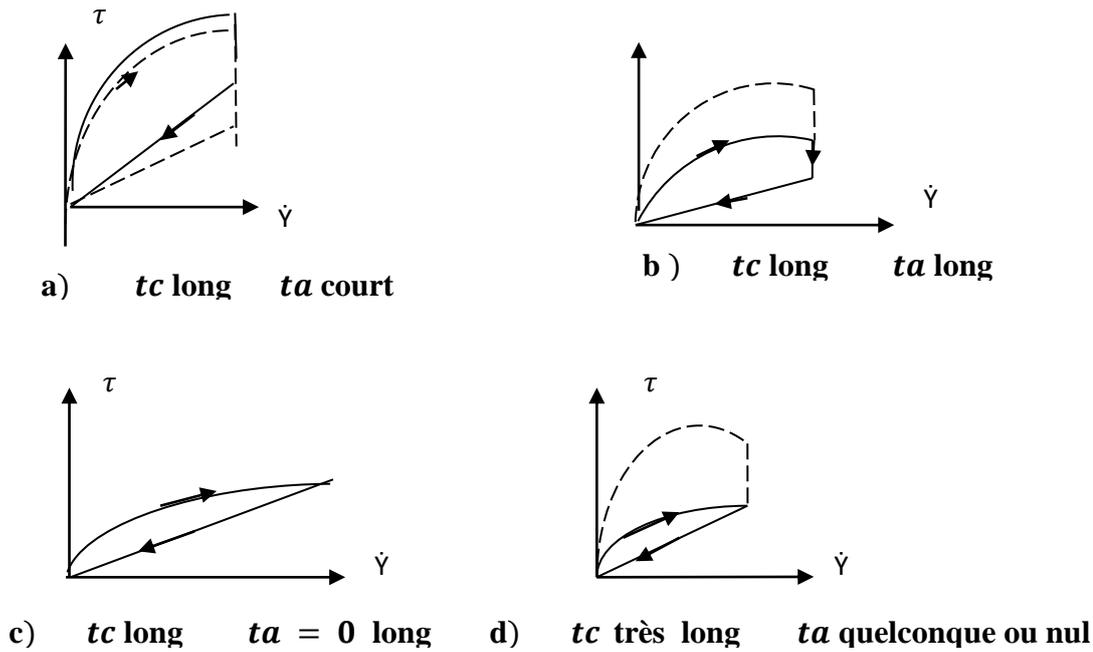


Fig.II.32 Différentes boucles d’hystérésis pour des modes opératoires variables

remarque : une boucle quelconque d’hystérésis ne caractérise pas complètement la thixotropie d’un corps pour ce faire, on pourrait ne considérer que les rhéogramme faits à condition s expérimentales fixées comme la boucle de référence qui sont bien reproductibles ou encore considéré des quantités comme :

$$u_{max} - u_{min} \quad u_{max_u_{min}} / u_{min}$$

2. Les fluides antithixotropes :

C’est l’effet inverse de la thixotrope, L’antithixotropes prend naissance quand l’agitation du liquide accroît la formation de structure au sein de celui-ci notamment la viscosité apparente augmente avec le temps a une contrainte τ ou $\dot{\gamma}$ données. , ce terme est à préférer à celui de rhéopexie, le terme rhéopexie et aussi utilisé pour l’antithixotropes qui es moins bien défini et non totalement équivalent : à la propriété de solidification progressive par agitation.

Mais il est aujourd’hui convenu par les spécialistes et de réservé au cas de fluides thixotropes ou, après Cisaillement assez fort, l’épaississement accéléré par un mouvement d’où et régulier abouti à la prise au masse.

Les fluides antithixotropes sont rares, nous n'en connaissant pas dans les fluides lubrifiant. la mayonnaise en est un exemple

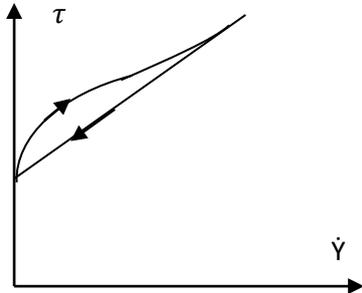


Fig.II.33 Corp. plastique thixotrope Sans contrainte du seuil

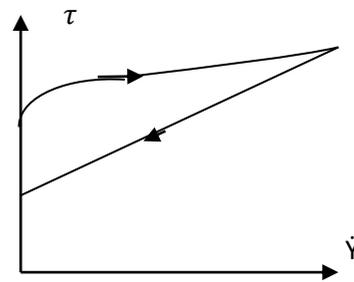


Fig.II.34 Corp. plastique thixotrope Modification de la contrainte de seuil

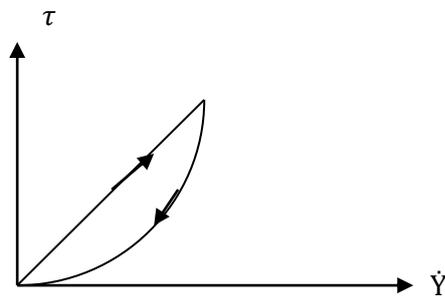


Fig.II.35 Corps épaississant thixotrope

IV. Principes et description des principaux rhéomètres :

Il existe des différents rhéomètres utilisés pour caractériser le comportement rhéologique des matériaux, nous distinguerons trois grandes classes de rhéomètres :

1-les rhéomètres à régime permanent, fonctionnant essentiellement en viscosimètres pour déterminer les viscosités et les rhéogrammes τ et $\dot{\gamma}$ de substances liquides [16]

2-les rhéomètres à régime transitoire qui permettent l'étude des propriétés viscoélastiques des matériaux

3-enfin, les rhéomètres dynamiques fonctionnant en régime sinusoïdal et fournissant une description très complète des propriétés rhéologiques des substances

Remarque : certains rhéomètres condition de leur adjoindre des équipements accessoires, sont susceptibles de fonctionner aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire ou dynamique ; il en est ainsi de la plupart des rhéomètres de type Couette.

1) Rhéomètres à régime permanent :

Il fonctionne avec un Mouvement laminaire de cisaillement indépendant du temps c'est-à-dire pas de modification de la vitesse et de la contrainte de cisaillement au cours du temps, uniquement pour les substances liquides (écoulement permanent).

Il existe plusieurs types de rhéomètres à régime permanent :

1.1 les rhéomètres de type couette [11] [16]

Dans lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces solides, l'une au repos, l'autre mobile.

1.2 les rhéomètres de type poiseuilles

Dans lesquels le mouvement de cisaillement est engendré par l'application aux extrémités d'un tube cylindrique contenant l'échantillon d'une différence de pression ou encore par l'action de pesanteur

1.3 viscosimètres à chute de bille : dont les possibilités sont limitées, mais qui est cependant très connu et relativement utilisé.

1.1.1 Rhéomètres plans à translation :

la substance à étudier est placée entre deux plans solides parallèles et de même surface S_1, P_1, P_2 ; une force F constante est appliquée d'une manière tangentielle au plan mobile P_2 , lui communiquant un mouvement de translation parallèle à lui-même, de vitesse V_0 , le plan P_1 demeurant fixe (fig.33)

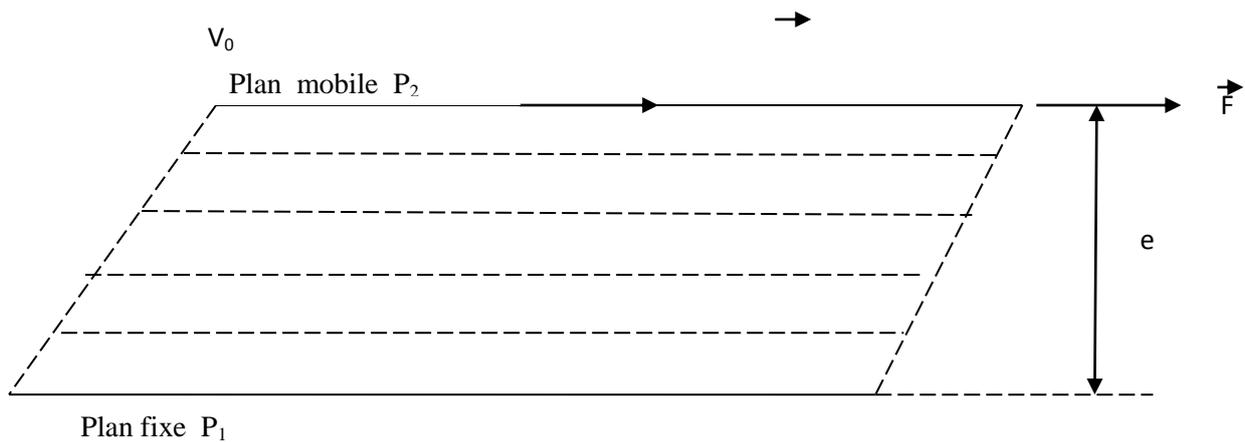


Fig.II.36 rhéomètre de type couette

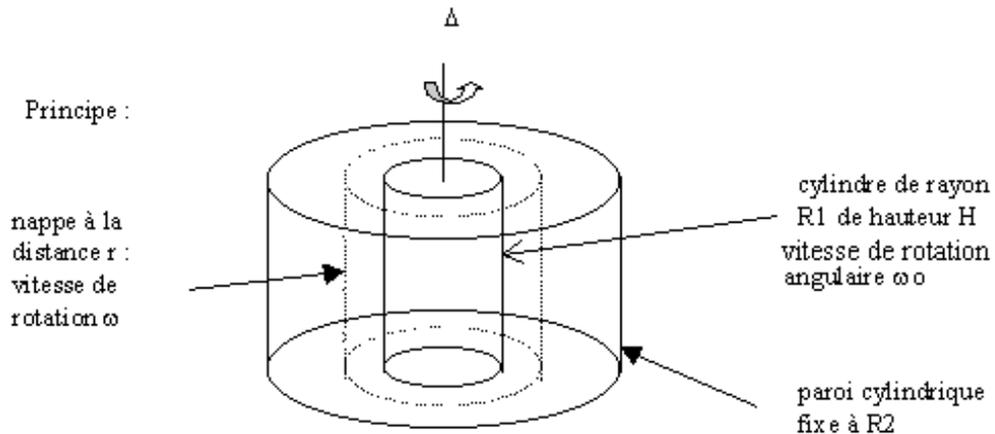
un mouvement laminaire de cisaillement est engendré :si l'on suppose que la distance e entre les plans est faible devant les dimensions linéaires de la surface S des plans, on pourra admettre, en négligeant les effets de bord que l'écoulement possède la symétrie plane et que le matériau se décompose en plan parallèle aux surfaces P_1, P_2 , animés de vitesses distinctes qui se répartissent continument de V_0 (vitesse de la couche au contact de P_2) à 0 (vitesse de la couche au contact de P_1).

Le problème qui se pose est de calculer la contrainte de cisaillement τ et γ en chaque point de l'échantillon à partir des grandeurs physiques accessibles expérimentalement : F appliquée au plan solide P_2 et la vitesse de translation V_0 correspondante.

Les rhéomètres plan sont peu nombreux, peu précis, ils sont généralement utilisés pour des contrôles grossiers, on peut les classer en deux catégories :

- appareils à lames, qui sont utilisés pour mesuré la viscosité de 1 à $3 \cdot 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- appareils à plaques, pour la mesure de viscosités entre 10 et $10^{10} \text{ Pas} \cdot \text{s}$

1.1.2 Rhéomètres rotatifs cylindriques :



FigII.37 Rhéomètre rotatif cylindrique

C'est le type de rhéomètres le plus fréquemment utilisée. La substance étudiée est emprisonnée entre deux cylindres de révolution, de même axe et de rayons R1 et R2 et de hauteur H, le mouvement de cisaillement obtenue en communiquant à l'un de cylindre un mouvement rotationnel uniforme de vitesse angulaire (ω0) l'autre cylindre est fixe, le cylindre mobile peut être (l'intérieur ou l'extérieur) Suite à ce mouvement relatif il apparait en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ et une contrainte de cisaillement τ .

La contrainte sera donnée par :

$$\tau (r) = \frac{M}{2\pi r^2 h} \quad .55$$

L'expression de $\dot{\gamma}$ sera :

$$\dot{\gamma} = r \frac{d\omega}{dr} \quad .56$$

Dans le cas d'un entrefer étroit :

$$\tau = \frac{\tau (R1) + \tau (R2)}{2} \quad .57$$

$$\dot{\gamma} = R1 \frac{\omega_0}{R2 - R1} \quad .58$$

$$\omega_0 = K \ln(R2/R1)$$

Les rhéomètres rotatifs sont souvent automatisés ce qui permet l'enregistrement graphique direct des rhéogrammes τ et $\dot{\gamma}$, ils sont très nombreux on distingue :

Les appareils à vitesse de rotation (ω_0) imposé, qui sont utilisés pour mesuré la viscosité entre 10^3 et 10^4 PA.S

Appareils couple M imposé, pour la mesure de viscosités entre 10^{-3} et 10^7 pa.s

- **Leur avantage :** Faible quantité de produit, Gamme de viscosité assez large, Déformation homogène et Facilité de chargement
- **Leurs inconvénients :** résidents dans le besoin d'avoir un volume d'échantillon important, écoulement secondaire à haute vitesse de cisaillement et l'impuissance d'étudier des substances à une grande viscosité (plus de 10^7 pa.s).

1.1.3 Rhéomètres rotatifs à cônes/plateau :

Bien que moins répandu que le rhéomètre cylindrique, ce type de rhéomètres possède de très grandes quantités qui font de lui un concurrent et un complément indispensable au rhéomètre cylindrique.

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) que fait la génératrice du cône et le plateau est très faible : il est toujours inférieur à 5° ($< 5^\circ$) et peut descendre jusqu'à $0,5^\circ$

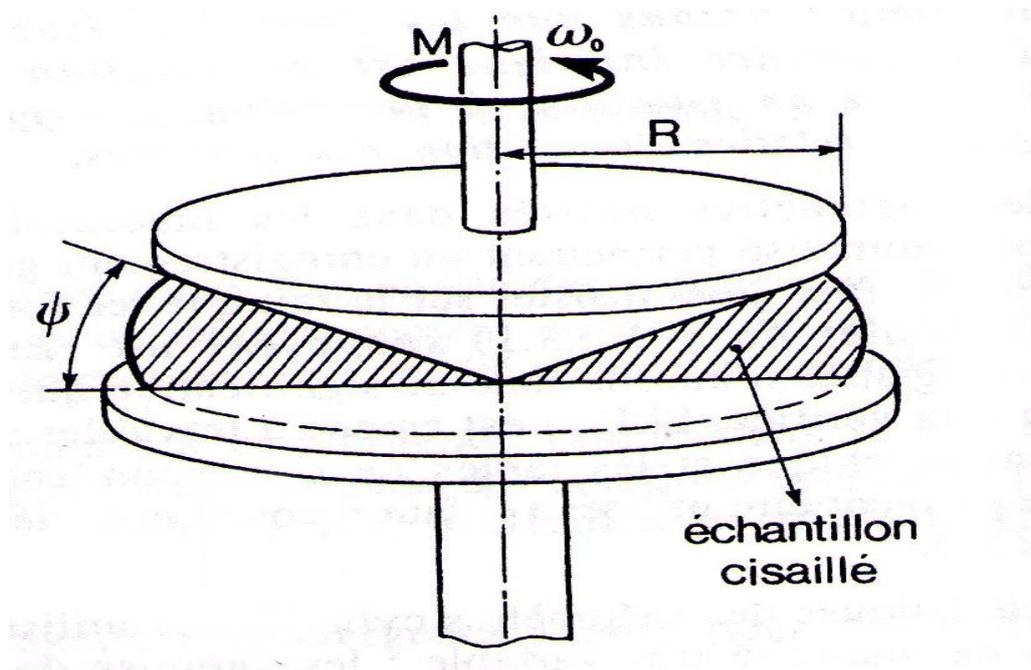


Fig.II.38 Rhéomètre rotatifs à cônes/plateau

Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant au cône une vitesse de rotation constante (ω_0), le plateau demeurant fixe. la substance se décompose alors en couches qui sont constituées par des cônes de révolution de même sommet et axe que le cône solide.

Par suite du mouvement relatif de couches les unes par rapport aux autres, on a l'apparition en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement et une contrainte de cisaillement.

Deux procédures expérimentales :

Soit on impose au cône un couple de rotation M pour mesurer la vitesse angulaire (ω), ou bien le contraire c'est-à-dire on impose une vitesse angulaire (ω) et on mesure le couple de rotation M correspondant, d'où on peut calculer la valeur de τ en n'importe quel point de l'entrefer.

$$\tau = 3 M / (2\pi R^3) \quad .59$$

$$\dot{E} = \omega \circ / \Psi$$

1.1.4 Rhéomètre type poiseuille (lois de poiseuilles)

Soit un capillaire de rayon R , de longueur L . Le liquide peut s'écouler grâce à une pression motrice $P_1 - P_2 = P$. On supposera que le régime d'écoulement est laminaire (vrai) si l'écoulement est suffisamment lent, nombre de Reynolds < 2000). Dès qu'il se met en mouvement, des forces de frottement apparaissent et augmente jusqu'à ce qu'on atteigne le régime permanent pour lequel les forces de frottement compensent exactement les forces de pression, la vitesse d'écoulement est alors constante. se met en mouvement, des forces de frottement apparaissent et augmente jusqu'à ce qu'on atteigne le régime permanent pour lequel les forces de frottement compensent exactement les forces de pression, la vitesse d'écoulement est alors constante. La partie cylindrique de liquide de rayon r est soumise aux forces de pression et de frottement visqueux :

- de pression : $F_1 = P_1.S = P_1 \pi r^2$ et $F_2 = P_2 \pi r^2$
- de frottement visqueux : $F_t = \Sigma dF_t = \tau 2\pi r L$

En régime permanent : $F_1 = F_2 + F_t$

- $\Delta P . \pi . r^2 = \tau 2\pi L$ ou $\tau = \eta . \dot{E}$ et $\dot{E} = -dv/dr$ ici (v augmente si r diminue)
- $dv/dr = - \Delta P . r / 2L\mu$

Lois d'écoulement de Poiseuille :

$$Dv = \Delta P \pi R^4 / (8 L \mu) \quad .60$$

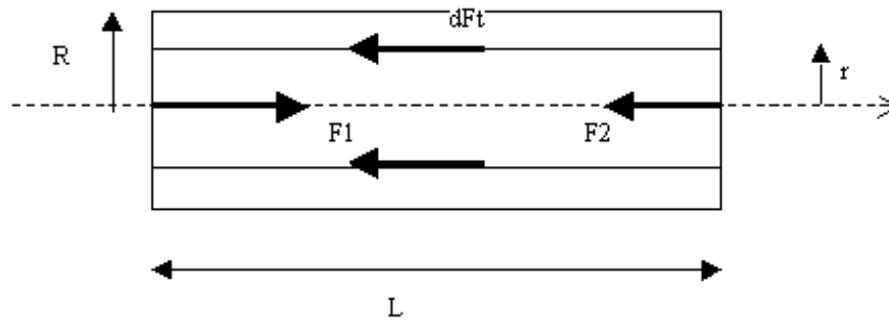


Fig.II.39 Rhéomètres Type Poiseuille

1.1.5 Viscosimètres à chute libre:

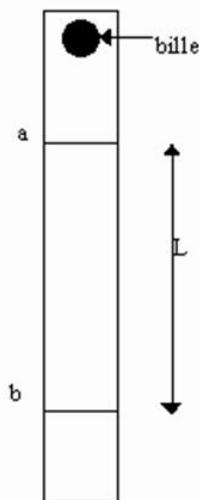
On lâche une bille (masse volumique ρ_s , rayon R) dans un liquide visqueux (viscosité η masse volumique ρ): elle chute sous l'effet combiné :

- de la force de pesanteur : $\rho_s V g = \rho s \left(\frac{4}{3} \pi R^3\right) g$
- de la Poussée d'Archimède: $\rho V g = \rho s \left(\frac{4}{3} \pi R^3\right) g$
- de la force de frottement : $F = 6 \pi R \eta V_{lim}$ (loi de Stoke)

La force de frottement apparaît lorsqu'il y a mouvement et augmente jusqu'à ce qu'on atteigne une vitesse limite V_{lim} pour laquelle la force de frottement et la Poussée d'Archimède compensent exactement la force de pesanteur :

- $\sum F = 0$
- $(\rho_s - \rho) \left(\frac{4}{3} \pi R^3\right) g = 6 \pi R \eta V_{lim}$
- $\eta = \frac{\frac{2g}{9}}{V_{lim} \times R^2 (\rho_s - \rho)}$

On mesure donc ρ_{lim} pour déterminer la viscosité dynamique η .



Le repère a est suffisamment éloigné du point de lâcher de la bille pour qu'on soit sûr d'être à la vitesse limite entre a et b : $v_{lm} = L / t$



En fait la mesure de v_{lm} serait assez imprécise si on n'opérait pas dans un tube assez étroit à cause des effets de tangage de la bille autour de sa trajectoire théorique verticale. Mais de ce fait on a des effets de parois qui modifie sensiblement le calcul. De plus, on opère souvent avec le tube incliné.

Cependant on vérifie toujours :

- $\eta = K (\rho_s - \rho) t$

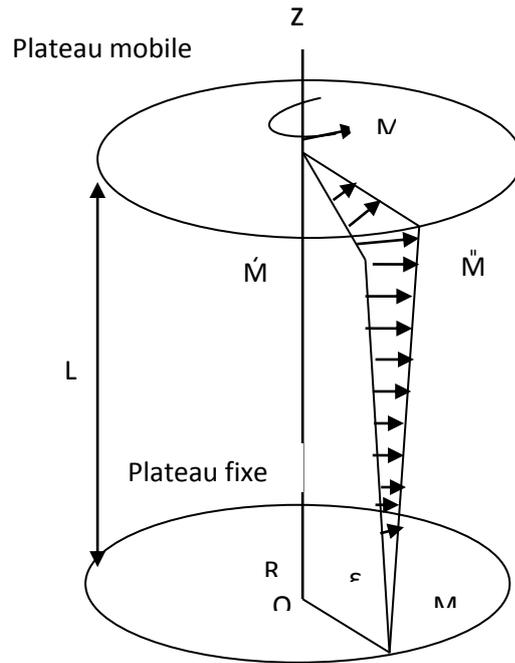
où K est une constante d'étalonnage de l'appareil pour une bille donnée et une inclinaison donnée.

Fig.II.40 viscosimetre chute à bille

2) Rhéomètre a régime transitoire

2.1 Rhéomètre à fluage

Ce type appelé aussi rhéomètre de torsion, constitué par deux disques parallèles, de même axe Oz, de rayon R distants de L, l'un de disque est mis en repos l'autre soumis à un couple M, sous l'effet du couple M la substance se décompose en couches circulaires parallèles aux disques solides.



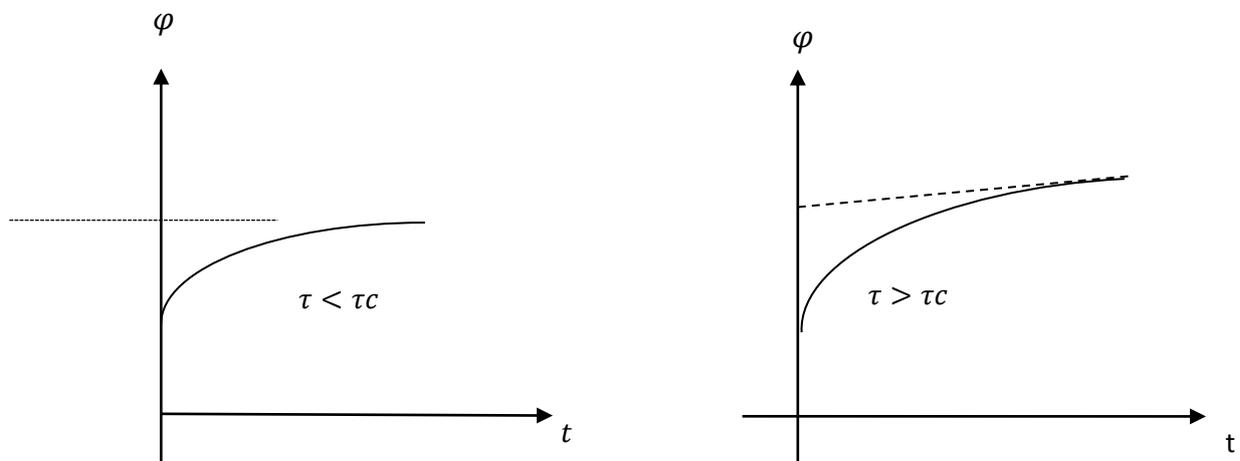
$$M'M'' = R\dot{\phi}(t)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{R}{L}\phi(t)$$

$$= \frac{M'M''}{L}$$

Fig.II.41 Rhéomètre à fluage

- La mesure de viscosité est extrêmement élevée
- La détermination des seuils d'écoulement avec précision
- Difficulté de mesurer avec précision le coefficient d'élasticité instantané J_0
- Impossible de mesurer les petits temps de retard de l'échantillon
- Difficulté de d'analyser mathématiquement la fonction de fluage



**Fig.II.42 présente les deux graphes angles de rotation $\varphi = \varphi(t)$ observés en-deçà
 Et au-delà du seuil d'écoulement τ_c**

2.2 Rhéomètres à relaxation

La relaxation consiste à soumettre l'échantillon à une déformation instantanée qu'on maintient constante et à enregistrer l'évolution au cours du temps. Les tests de relaxation présentent le même type d'avantages et de limites que les tests de fluages.

3) Rhéomètres dynamiques ou oscillants

On peut distinguer deux types d'appareils selon que le mouvement est entenu ou non :

Rhéomètre à oscillations forcées, peuvent fonctionner dans toute une gamme de fréquence ou une seule fréquence particulière (*rhéomètre résonants*).

Rhéomètres à oscillations libres, permettent de mesurer de faibles viscosités par l'étude de l'amortissement.

3.1 Rhéomètres à oscillations forcées :

Le déplacement périodique de translation $x(t)$ est imposé et repéré sur une face de l'entrefer, et on mesure la force $F(t)$ sur l'autre face, cette force mesurée est la seule force de frottement visqueux.

3.1.1 Rhéomètre a plateaux :

L'échantillon maintenu entre les deux plateaux par capillarité, l'un des plateaux supporte une grande masse qui le fixe, la force et le déplacement sont transformés en tension par des traducteurs électromagnétiques (T.E.M), le domaine de 10 à 1000 Hz de fréquence est favorable.

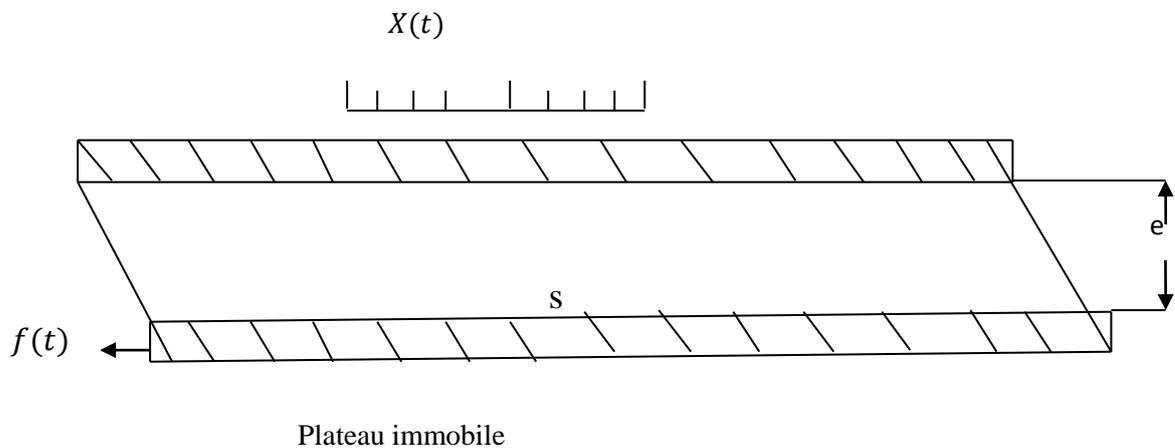
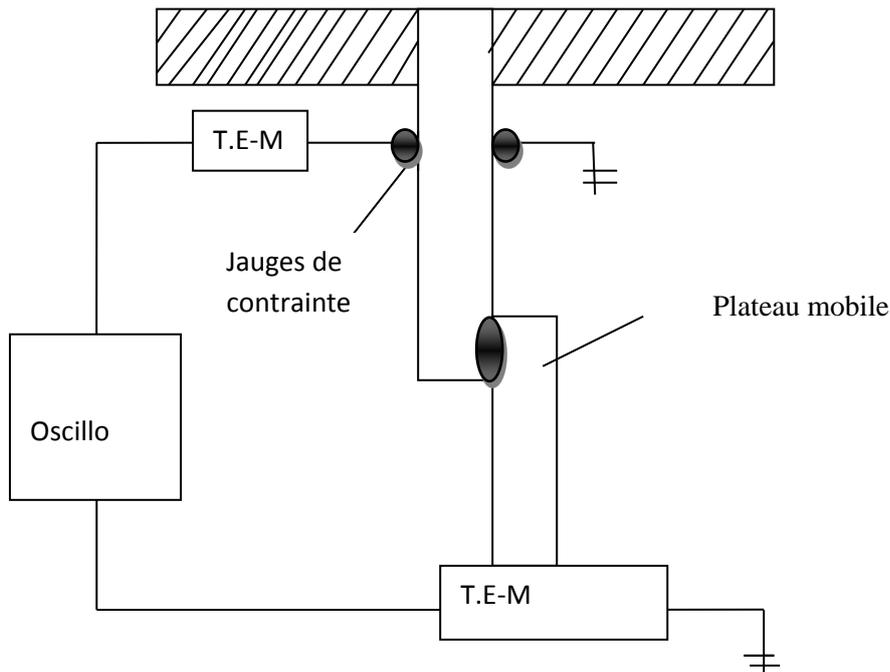


Fig.II.43 Rhéomètre plan plan en translation

3.1.2 Rhéomètres cylindriques en translation :

Ils ont le même fonctionnement avec une géométrie différente, les deux faces de l'entrefer sont des cylindres, l'un est fixe l'autre est en mouvement de translation sinusoïdal suivant l'axe, Ces rhéomètres sont peu précis. L'imprécision vient de la détermination expérimentale de la contrainte sur le stator et de l'approximation faite, stator immobile.

Fig.II.44 schéma du rhéomètre à plateau



Ces rhéomètres sont peu précis. L'imprécision vient de la détermination expérimentale de la contrainte sur le stator et de l'approximation faite, stator immobile. [11]

3.1.3 Rhéomètres cylindriques oscillants :

Ce sont des rhéomètres cylindriques où le rotor imprime des mouvements oscillatoires de fréquence de 0.1 à 10 Hz et des amplitudes de quelque centième de radians.

3.1.4 Rhéomètre cône /plateau oscillants

Ce sont des rhéomètres fonctionnant 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.

3.1.5 Rhéomètre plateau /plateau en rotation :

Cette géométrie est également utilisée en essais dynamiques car elle présente d'avantage sur les deux précédentes de pouvoir faire varier très facilement la distance entre les plateaux.

Ce sont les rhéomètres à fréquence variable les plus précis. Cependant elle décroît en fonction de la fréquence. [11]

3.1.6 Rhéomètre utilisés à la résonance libre

Ces appareils sont simples, précis (généralement la résonance est déterminée avec une très bonne précision, Le principe est encore celui des oscillations forcées, ne permettent des mesures qu'à une fréquence, (fréquence de résonance), ils ne peuvent servir à une étude complète de la viscoélasticité.

3.1.6.1 Rhéomètre cylindriques résonants 'exemple' :

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 de rechercher expérimentalement la fréquence du courant à la résonance.

3.2 Les appareils à oscillations libres

Dans la pratique les appareils de ce type sont des rhéomètres cylindriques, le cylindre intérieur étant rappelé par un fil de torsion auquel il est suspendu. On enregistre les déplacements angulaires de ce cylindre, ils sont utilisés pour des corps newtoniens de faible viscosités (certains gaz et liquides) pour lesquels il est plus simple de mesurer un amortissement qu'un couple.

• Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons exposé des généralités sur la rhéologie, on a rappelé quelques propriétés élémentaires du comportement des matériaux et on a vu les différents comportements rhéologiques d'un fluide que l'on peut rencontrer, par la suite on a défini les lois de leurs paramètres intrinsèques. À la fin nous avons passé en revue les différentes méthodes et instruments de mesure (rhéomètres), et cela nous a permis d'enrichir les connaissances nécessaires avant de passer au mode expérimental.

• Introduction :

Dans ce troisième chapitre on s'intéresse à la caractérisation du comportement rhéologique de l'huile TASFALUT 40. On a divisé ce chapitre en deux parties ; partie une pour présenter les différents dispositifs expérimentaux utilisés dans l'étude, partie deux pour présenter les manipulations, les résultats obtenues, les interprétations et les relations avec les différents paramètres rhéologiques.

I. dispositifs expérimentaux :

1. Appareillage :

Au cours de ce travail l'appareillage suivant a été utilisé (fig. 1)

2. Rhéomètre HAAKE RheoStress 1 :

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un rhéomètre HAAKE RheoStress 1 pour la mesure des propriétés visqueuses et des propriétés viscoélastiques, doté d'un système de mesure contrôlé par un ordinateur. Disponible à la faculté génie de la construction laboratoire de recherche.



Fig.III.1. Rhéomètre HAAKE RheoStress

3. A propos RheoStress 1 :

HAAKE RheoStress 1, universel Rhéomètre de laboratoire avec Les caractéristiques d'une classe de recherche .Ces excellentes capacités sont réalisées Par l'utilisation d'une 4ème génération Roulement d'air et signal numérique Technologie processeur (DSP). Le rapide Boucles de contrôle adaptatives numériques utilisées dans HAAKE RheoStress 1, permet à tous Type de mesures dans CS, CR et Mode CD en rotation et oscillation.[20]

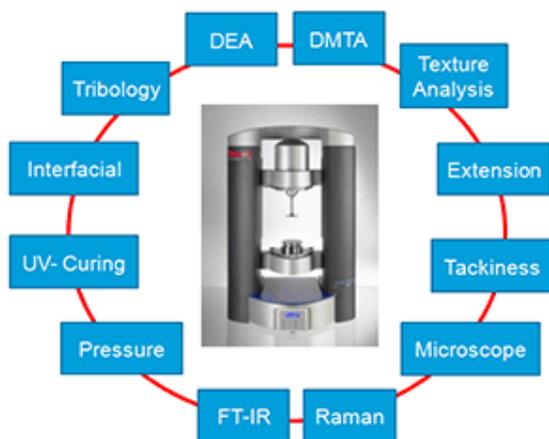


Fig.III.2. Différentes qualités d'un rhéomètre

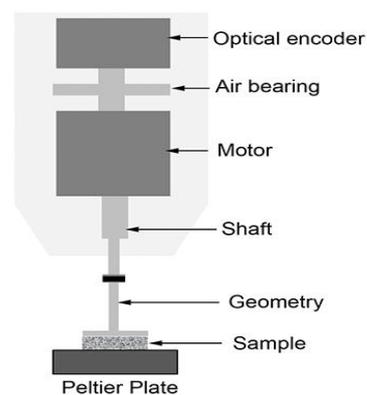


Figure 3 Schematic diagram of a stress-controlled rheometer main unit.

Fig.III.3. Constituants du rhéomètre



Fig.III.4. Méthode de mesure d'un rhéomètre

4. Logiciel HAAKE RheoWin :

1) Modules logiciels

Personnaliser HAAKE RheoWin aux besoins HAAKE RheoWin peut être adapté pour répondre aux exigences individuelles via des modules spéciaux :

- ✓ Instantané pour une caractérisation rapide
- ✓ D'un échantillon inconnu RheoWizard®; L'aide de l'expert
- ✓ Système de création de nouveaux emplois
- ✓ Contrôle du code à barres pour le flux de travail
- ✓ Optimisation (GLP)
- ✓ Interface SAP pour l'échange de données
- ✓ Comparaisons automatiques avec des données de référence / courbes de base

Logiciel de polymère HAAKE RheoSoft (WLF, spectres de temps de relaxation, Distribution du poids moléculaire)

- ✓ Outils pour le respect des exigences de la partie 11 de la FDA 21 CFR

HAAKE RheoWin Mesure, évaluation et exportation de données via Drag-&-Drop
 HAAKE RheoWin est une mesure complète et Logiciel d'évaluation pour tous les modes de mesure. Il Contrôle HAAKE RheoStress 600 et les poignées des données mesurées, soit graphiquement, soit comme table.

Voici quelques points saillants:

- ✓ Définition des séquences de mesure et d'évaluation ("Emplois") en utilisant Drag-&-Drop.
- ✓ Mesure et évaluation entièrement automatisée.
- ✓ Un emploi à large choix de méthodes d'évaluation rhéologique.
- ✓ Exportation de données ASCII librement configurable.
- ✓ Économie intermédiaire automatique des données mesurées.
- ✓ Multitâche réelle; Mesures simultanées avec rhéomètres multiples.
- ✓ De véritable application 32 bits pour Windows® 95/98 / Me et NT / 2000 / XP
- ✓ Système de gestion des utilisateurs hautement configurable 12 oscillations disponibles des langues d'exploitation. [20]

2) Affichage / unité de contrôle

- ✓ Surveillance des données en ligne même sans PC
- ✓ L'unité d'affichage / commande du HAAKE RheoStress 600 est utilisé pour le fonctionnement manuel de l'ascenseur et le réglage de l'espace.
- ✓ Il sert également à établir des taux de cisaillement présélectionnés et à intervenir dans des mesures contrôlées par PC. [20]
- ✓ L'affichage couleur surveille des instruments rhéologiques et spécifiques à l'écoute librement sélectionnés des données en ligne. Les données peuvent également être affichées numériquement aussi graphiquement. Des séquences de mesure complexes sont transmises Out "en appuyant sur un bouton", sans utiliser un PC.
- ✓ L'unité d'affichage / contrôle fait partie de la livraison standard HAAKE RheoStress 600 High Performance et une option pour HAAKE Rheo Stress 600.

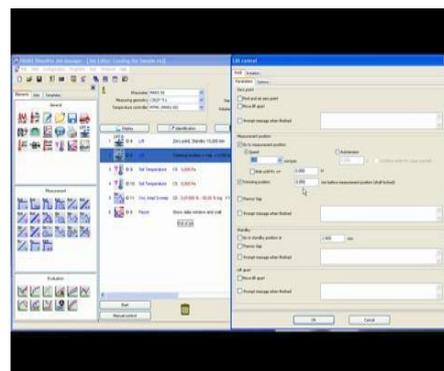
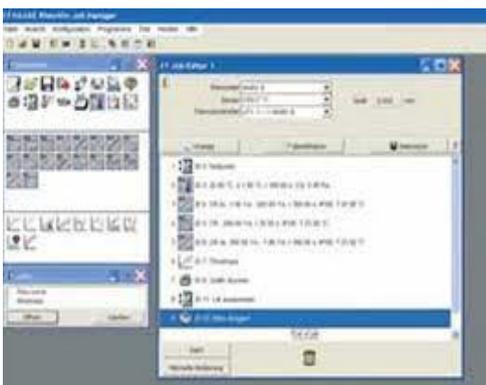
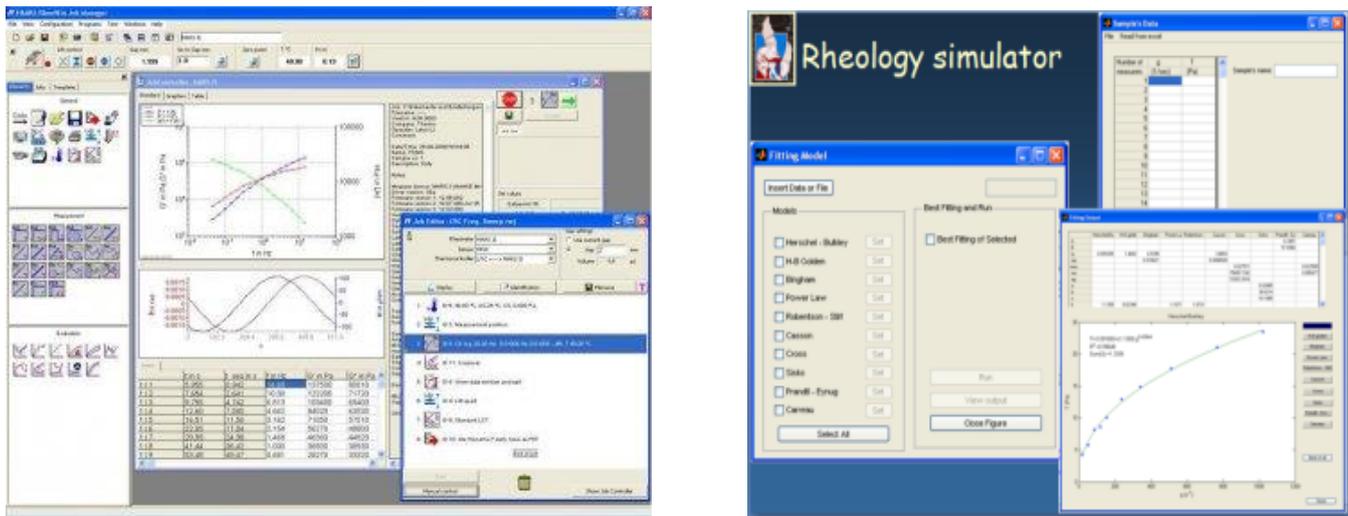


Fig.III.5. Quelques explications sur le logiciel



FigIII.6. Exemples de représentation graphiques

5. MATERIELS

- ✓ Des béchers gradués
- ✓ Des seringues à grand volume
- ✓ Une seringue a petit volume
- ✓ De l'eau distillée
- ✓ De l'huile (notre objet d'étude principale) qui as été considéré comme lubrifiant
- ✓ Un rhéomètre réglé a ces dimensions suivantes :

- **Température fluide** -20 à 300°C,
- **vitesse de rotation** 0,03-1500 s⁻¹
- **viscosité** 0.002 – 4.6E+06(mPascal.S) (cST)
- Courbes de débit, temps et température Propriétés dépendantes, point d'élasticité Détermination, glisse / récupération, Acquisition multi ondes, etc.

[20]

Model	HAAKE RheoStress 1
Angular resolution (μ rad)	0.3
Rotational speed CR-mode (min ⁻¹)	0.025 – 1200
Rotational speed CS-mode (min ⁻¹)	0.001 – 1200
Torque (mNm)	0.0005 – 100
Oscillation frequency (Hz)	0.0001 – 100 ²⁰
Multiwave (Hz)	0.01 – 10
Torsional movement (°)	360
Bearing	air bearing
Motor type	drag cup motor
Optional high shear	0.025 – 3200 rpm

Fig.III.7. Méthodes d'essais typiques



Fig.III.8. Différents outils utilisés



Fig.III.9. Exemples de béchers gradués

Mélangé jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène à l'aide de bécher



Fig.III.10. Exemples de seringues de différentes formes graduées



Fig.III.11. Exemple d'une seringue de petit format



Fig.III.12. Exemple d'une seringue de grand format gradué



Fig.III.13. L'eau distillée



Fig.III.14. Huile TASFALUT 40 de coupe



Fig.III.15. Exemples de mélangeurs utilisés

II. Manipulation

Notre travail est basé principalement sur l'étude du comportement rhéologique et l'influence de la température et du pourcentage de l'ajout de l'eau sur les caractéristiques rhéologiques intrinsèques de lubrifiant cas 20%

1. Préparation du Mélange de 20% de l'huile pour différentes températures du mélange considéré idéal (Eau + 20 % Huile)

On prend 20ml de l'eau et puis
35°C à 80 °C.

- On prend toujours 20ml d'eau et 4 ml d'huile

20 ml → 100%

x → 20%



Fig.III.16. Constituants avant et après mélange

2. Influence de la température sur le comportement rhéologique pour 20%

Pour le volume fixe 20% on prend une petite quantité du mélange à l'aide d'une seringue gradué et on met cette dernière au niveau de l'appareil Rhéomètre HAAKE RheoStress 1, On refait cette expérience trois fois pour s'assurer de la reproductibilité. On poursuit le même protocole à des températures entre 35°C et 80°C

3. Résultats Logiciel HAAKE RheoWin

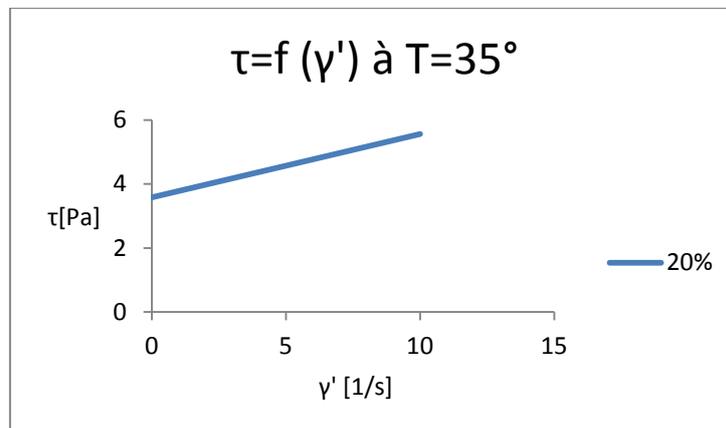
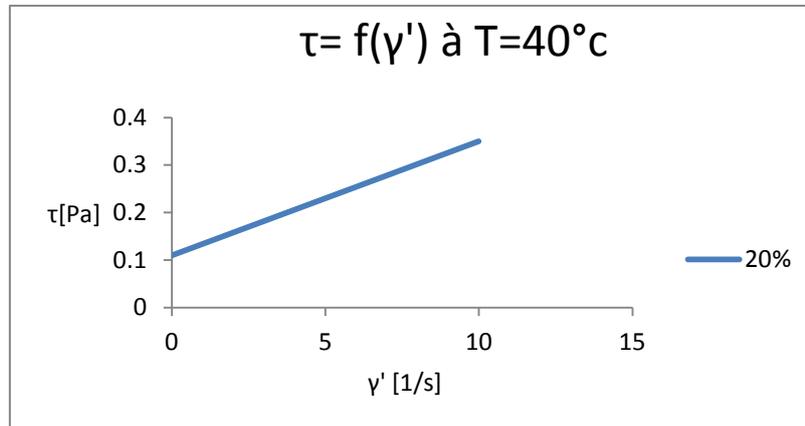


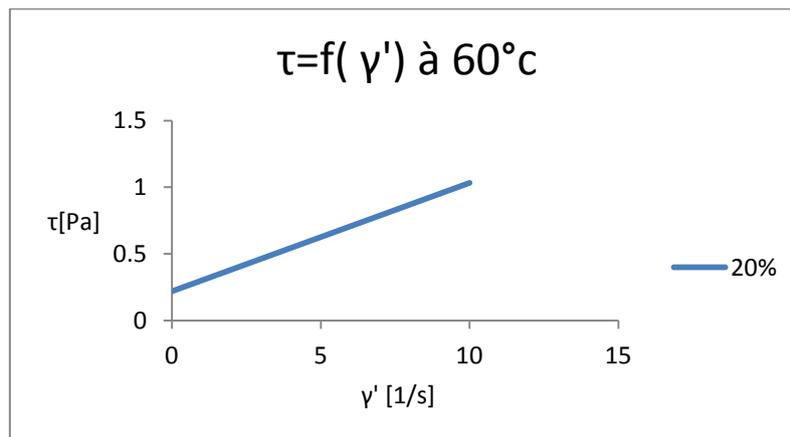
Fig III.17. La déformation en fonction de la vitesse de cisaillement à T= 35°C

Nb : pour tous les graphes représentent ci-dessous : τ : contrainte de cisaillement en pascal, $\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement en s⁻¹

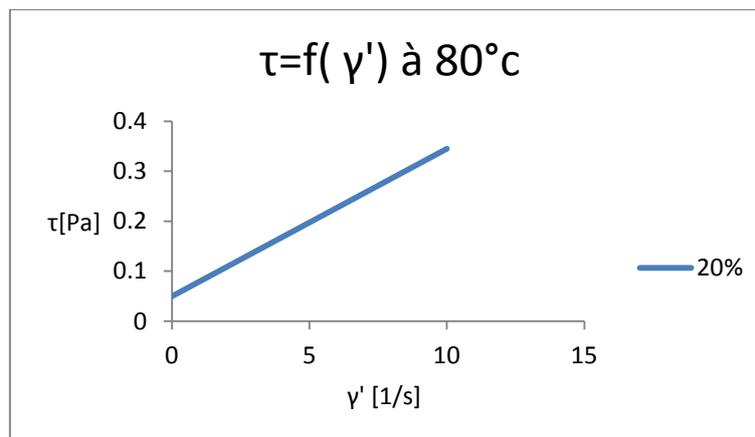
	$\text{tg } \alpha=0.198$ (Pas.S)
$X_a=0$	$X_b=10$
$Y_a=3.58$	$Y_b=5.56$

Tableau.III.1. La viscosité à $T= 35^\circ\text{C}$ Fig.III.18. La déformation en fonction de la vitesse de cisaillement à $T= 40^\circ\text{C}$

	$\text{tg } \alpha=0.024$ (Pas.S)
$X_a=0$	$X_b=9.99$
$Y_a=0.11$	$Y_b=0.35$

Tableau.III.2. La viscosité à $T= 40^\circ\text{C}$ Fig.III.19. La déformation en fonction de la vitesse de cisaillement à $T= 60^\circ\text{C}$

	$\text{tg } \alpha = 0.081 \text{ (Pas.S)}$
$X_a = 0$	$X_b = 10$
$Y_a = 0.22$	$Y_b = 1.033$

Tableau.III.3. La viscosité à $T = 60^\circ\text{C}$ Fig III.20. La déformation en fonction de la vitesse de rotation à $T = 80^\circ\text{C}$

	$\text{tg } \alpha = 0.029 \text{ (Pas.S)}$
$X_a = 0$	$X_b = 10$
$Y_a = 0.05$	$Y_b = 0.345$

Tableau.III.4. La viscosité à $T = 80^\circ\text{C}$

A. Analyse des résultats expérimentaux :

- Les graphes représentent des droites qui ne passent pas par l'origine elles sont sous la forme $Y = Ax + B$

B. Conclusion :

- La valeur de B est appelée seuil de déformation et elle est supérieure à zéro
- Le comportement du fluide (lubrifiant) suit une loi rhéologique de type Bingham

$$\tau = z + \gamma U$$

La valeur de pourcentage de 20% de l'ajout d'huile donné par le constructeur est idéale à condition que les paramètres rhéologique intrinsèque (U, z) du mélange soit relativement constant on fonction de l'élévation de la température et la présence des valeurs de z soient les plus petites possible, sur la fig.21.a et fig.21.b on a représenté l'évolution de ces paramètres en fonction de la température.

T (°c)	tg α (Pas.S)
35	0.198
40	0.024
60	0.081
80	0.029

Tableau.III.5. La viscosité pour différentes températures

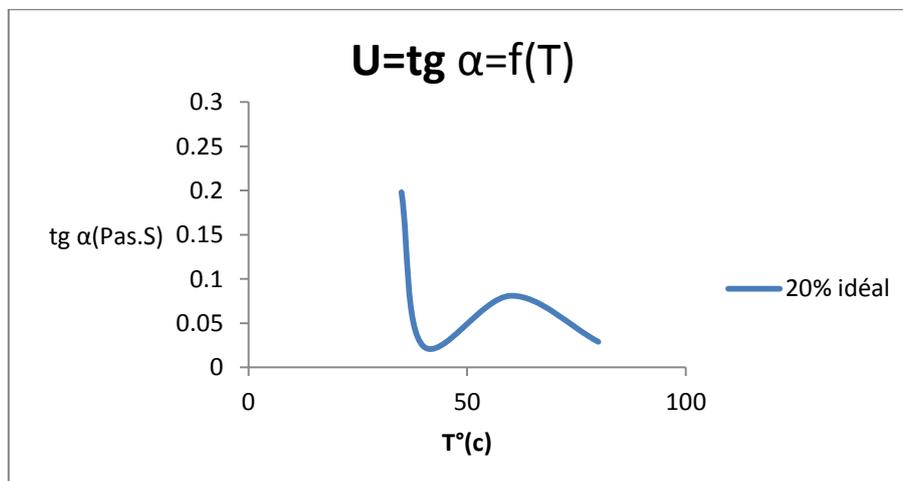


Fig.III.21.a La viscosité en fonction de la température pour 20% huile

- On remarque que La viscosité diminue en fonction de la température, l'augmentation brusque de la viscosité à $T=60^{\circ}\text{c}$ est probablement due aux erreurs de manipulations.

T(°c)	z (pascal)
35	3.58
40	0.11
60	0.22
80	0.05

Tableau.III.6. Valeurs représentantes
les seuils en fonction de T

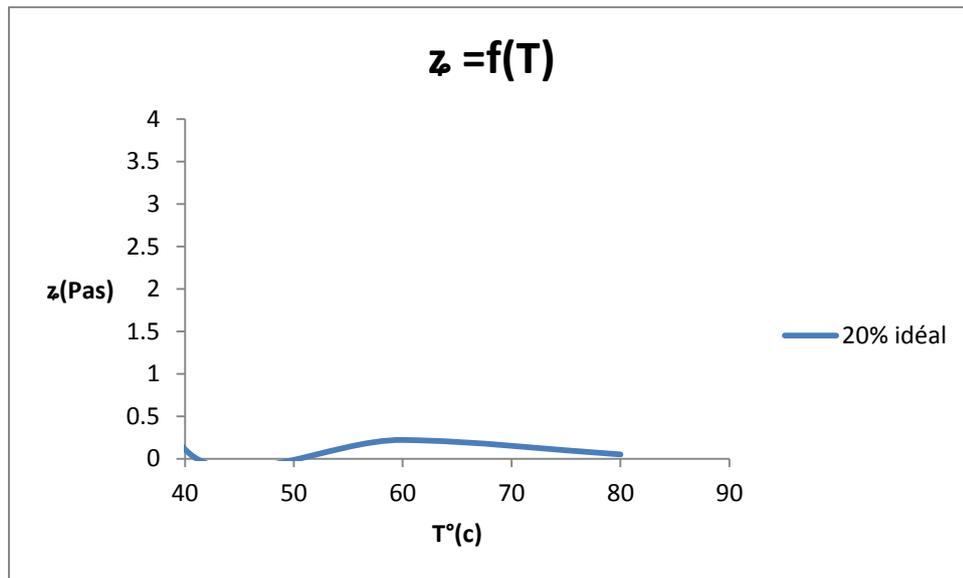


Fig.III.21.b les seuils en fonction de la température pour 20% huile

z [pascal] est progressivement stable.

Remarque :

On a montré par la suite que le pourcentage idéal n'est pas stable réellement à 20%

4. Manipulation pour tous les autres pourcentages :

Notre plan du travail est basé principalement sur l'étude du comportement rhéologique de l'huile

En se basant sur deux procédures principales :

1) Préparation du mélange (Eau + Différentes % Huile)

On prend 20ml de l'eau à un volume constant et puis on change à chaque fois le volume de l'huile toutes en appliquant la règle de trois suivantes :

$$20\text{ml} \longrightarrow 100\%$$

$$X \longrightarrow A\%$$

- On prend un volume initial 20 ml de l'eau
- On ajoute des pourcentages de l'huile suivant le tableau

% de l'huile	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
								100%
Volume de l'huile en ml	1ml	2ml	3ml	4ml	5ml	6ml	7ml	8ml
								9ml

Tableau.III.7. Valeurs représentantes % de l'huile en fonction du volume de l'huile

2) calcul de Mélange pour différentes températures

Pour chaque volume on prend une petite quantité du mélange à l'aide d'une seringue gradué et on met cette dernière au niveau de l'appareil Rhéomètre HAAKE RheoStress 1, à présent cet expérience doit être faites trois afin d'obtenir les meilleures valeurs désiré et puis on calcule la moyenne des trois valeurs après les avoir obtenus du logiciel utilisé. On poursuit le même protocole à des températures entre 35°C et 80°C

3) Résultats Logiciel HAAKE RheoWin

A. $\tau=f(\dot{\gamma})$ à 35°C pour différents pourcentages

A.a. Pour 5%H :

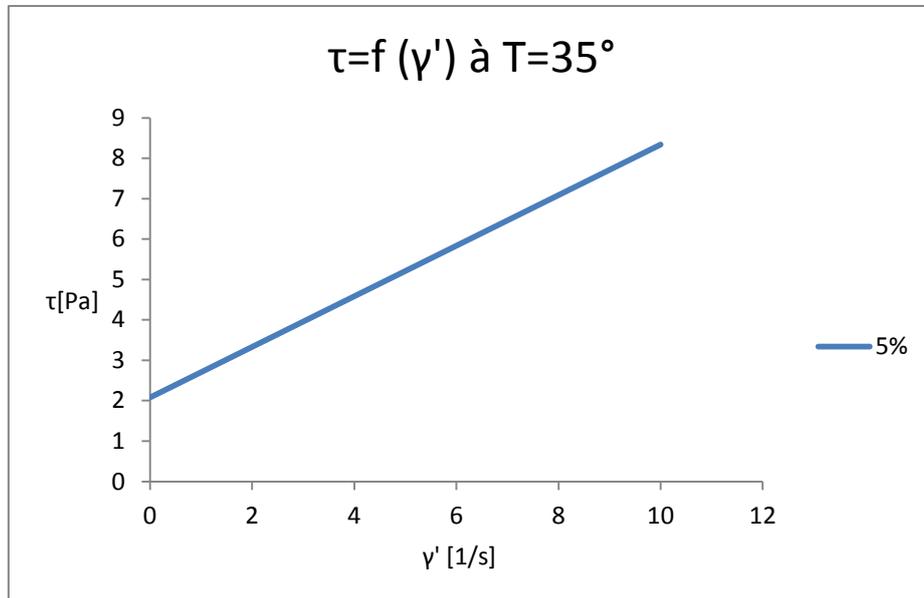


Fig.III.22. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5%H

Xa=0	Xb=10
Ya=2.08	Yb=8.34
tgα=0.626(Pas.S)	

Tableau.III.8. La viscosité pour 5%

A.b. Pour 10%H :

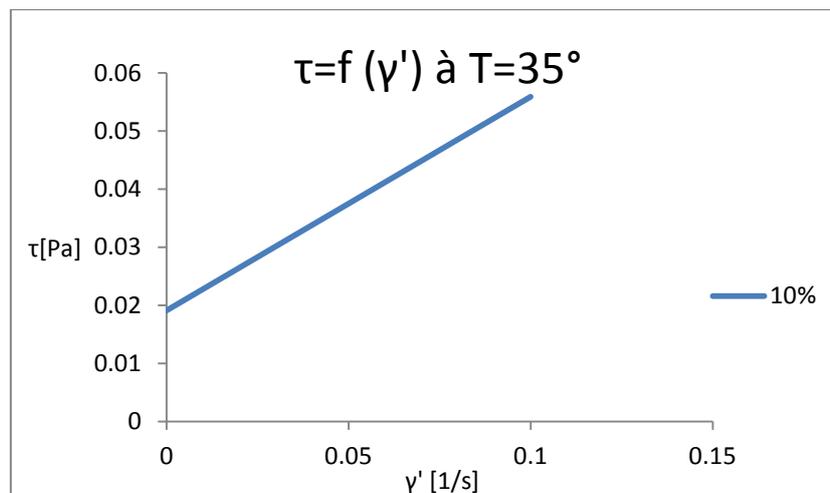
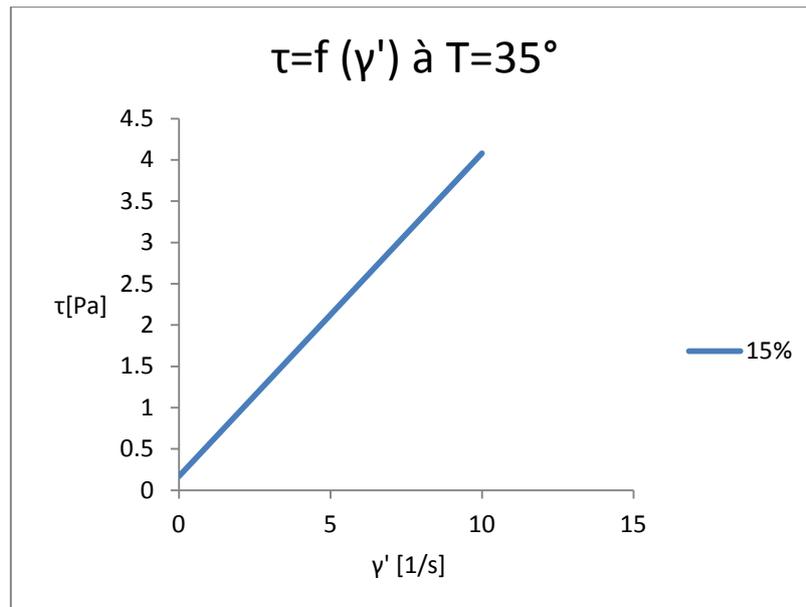


Fig.III.23 Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10 %H

$X_a=0$	$X_b=10$
$Y_a=1.91$	$Y_b=5.59$
$\text{tg } \alpha=0.36$	

Tableau.III.9. La viscosité pour 10%

A.c. Pour 15%H

**Fig.III.24. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 15 %H**

$X_a=0$	$X_b=10$
$Y_a=0.17$	$Y_b=4.08$
$\text{tg } \alpha=0.39$	

Tableau.III.10. La viscosité pour 15%

A.d. Pour 20%H

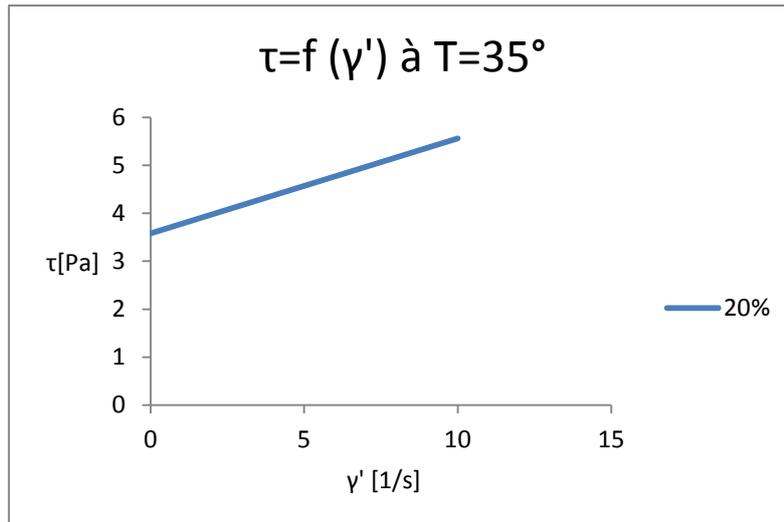


Fig.III.25. Déformation en fonction de la vitesse de rotation pour 20% H

$X_a=0$	$X_b=10$
$Y_a=3.58$	$Y_b=5.56$
$\text{tg } \alpha = 0.198 (\text{Pas.S})$	

Tableau.III.11. La viscosité pour 20%

A.e .Pour 25% H

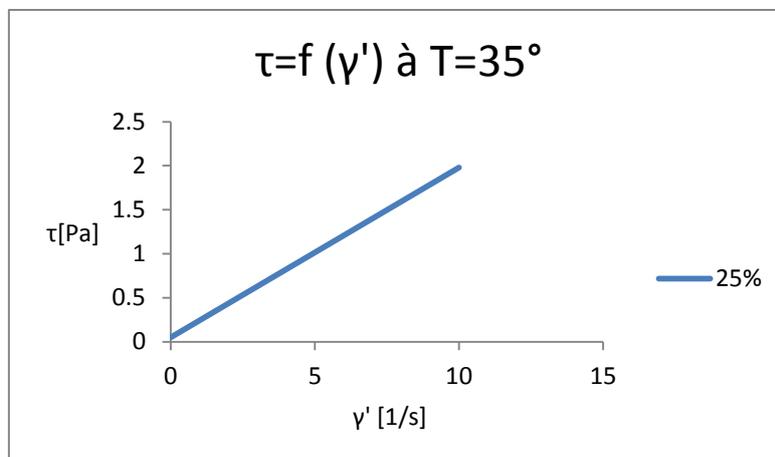


Fig.III.26. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 25% H

$X_a=0$	$X_b=10$
$Y_a=0.05$	$Y_b=1.98$
$\text{tg } \alpha = 0.193 (\text{Pas.S})$	

Tableau.III.12. La viscosité pour 25%

A.f .Pour 30%H

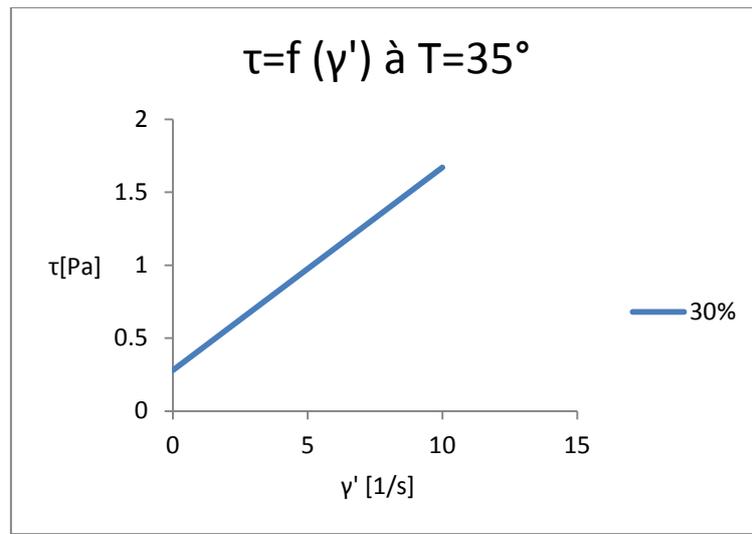


Fig.III.27. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 30 %H

$Xa=0$	$Xb=10$
$Ya=0.28$	$Yb=1.67$
$tg\alpha=0.127(Pas.S)$	

Tableau.III.13. La viscosité pour 30%

A.g. Pour 35%H

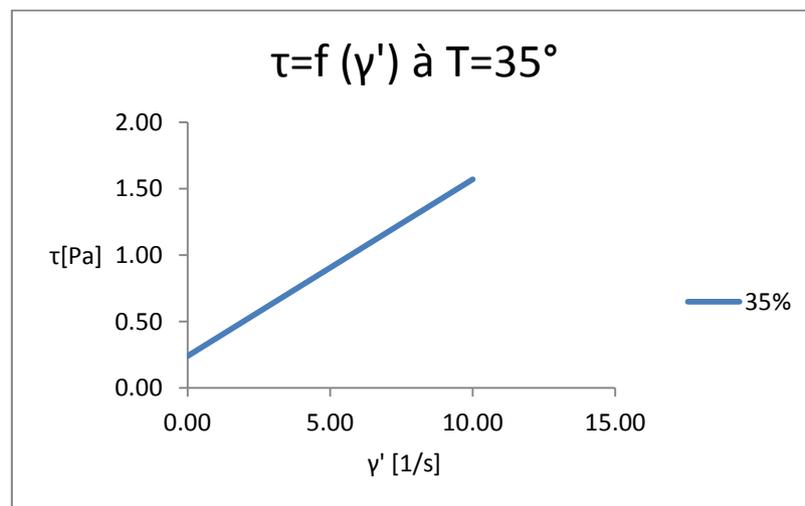


Fig.III.28. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 35 %H

Xa=0.00	Xb=10.00
Ya=0.24	Yb=1.57
tg $\alpha=0.133$ (Pas.S)	

Tableau.III.14. La viscosité pour 35%

A.h. Pour 40% H

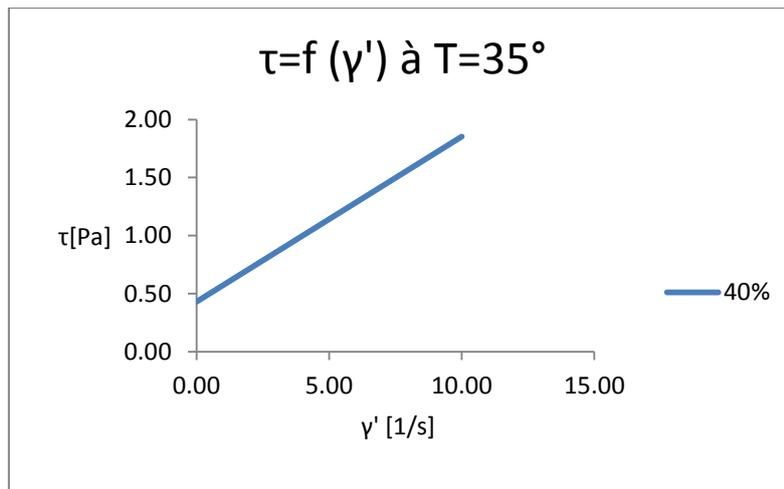


Fig.III.29. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40 % H

Xa=0.00	Xb=10.00
Ya=0.43	Yb=1.85
tg $\alpha=0.14$ (Pas.S)	

Tableau.III.15. La viscosité pour 40%

A.i. Pour 100% H

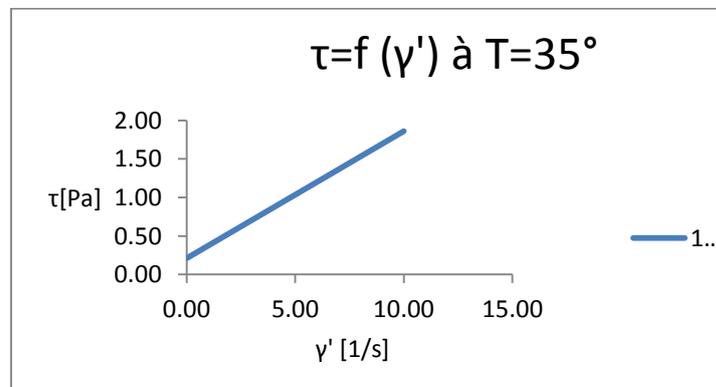


Fig.III.30. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 100 % H

X_a=0.00	X_b=10.00
Y_a=0.21	Y_b=1.86
tg α=0.165 (Pas.S)	

Tableau.III.16. La viscosité pour 100%

B. $\tau=f(\dot{\gamma})$ à 40°C

B.a. Pour 5% H

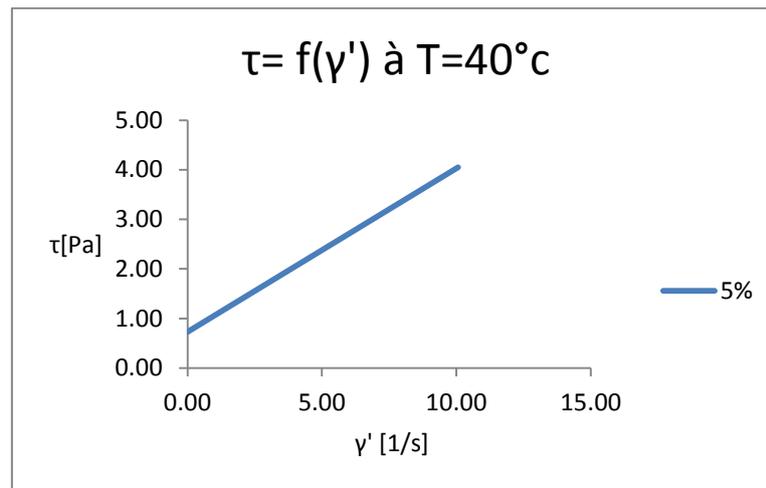


Fig.III.31. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5 % H

X_a= 0.00	X_b=10.06
y_a=0.73	Y_b=4.05
tgα=0.33(Pas.S)	

Tableau.III.17. La viscosité pour 5%

B.b. Pour 10% H

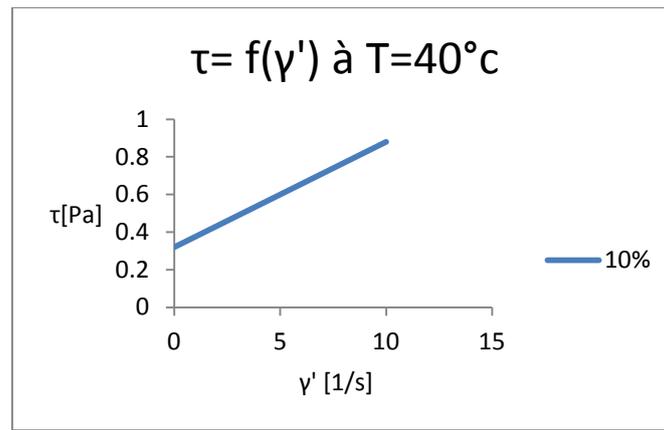


Fig.III.32. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10 % H

$X_a=0$	$X_b=10$
$\gamma_a=0.32$	$\gamma_b=0.88$
$\text{tg}\alpha=0.05(\text{Pas.S})$	

Tableau.III.18. La viscosité pour 10%

B.c. Pour 15% H

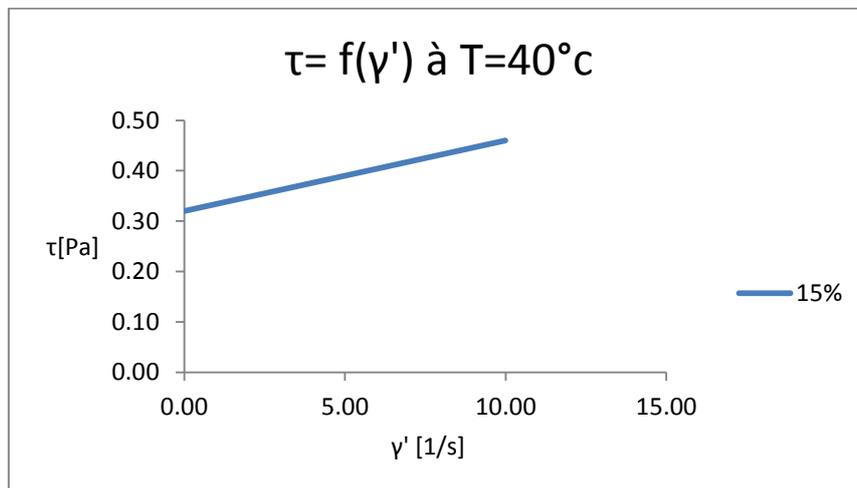


Fig.III.33. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 15% H

$X_a=0.00$	$\gamma_a=9.99$
$X_b=0.32$	$Y_b=0.46$
$tg\alpha=0.014(Pas.S)$	

Tableau.III.19. La viscosité pour 15%

B.d. Pour 20%H

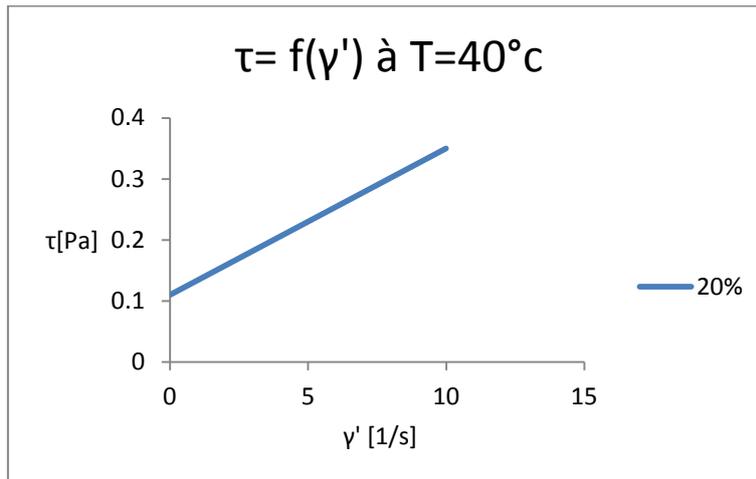


Fig.III.34. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 20 %H

$X_a=0$	$X_b=9.99$
$\gamma_a=0.11$	$Y_b=0.35$
$tg\alpha=0.024(Pas.S)$	

Tableau.III.20. La viscosité pour 20%

B.e. Pour 25%H

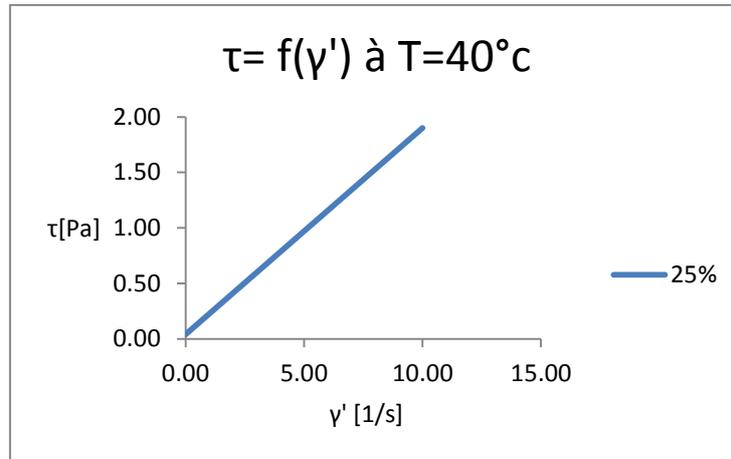


Fig.III.35. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 25 %H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$y_a=0.04$	$Y_b=1.90$
$\text{tg}\alpha=0.186(\text{Pas.S})$	

Tableau.III.21. La viscosité pour 25%

B.f. Pour 30%H

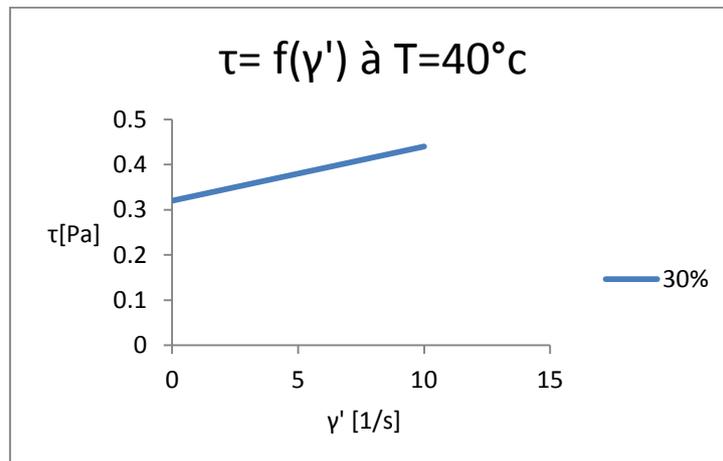


Fig.III.36. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 30 %H

$X_a=0$	$y_a=10$
$X_b=0.32$	$Y_b=0.44$
$tg\alpha=0.012$ (Pas.S)	

Tableau.III.22. La viscosité pour30%

B.g. Pour 35%H

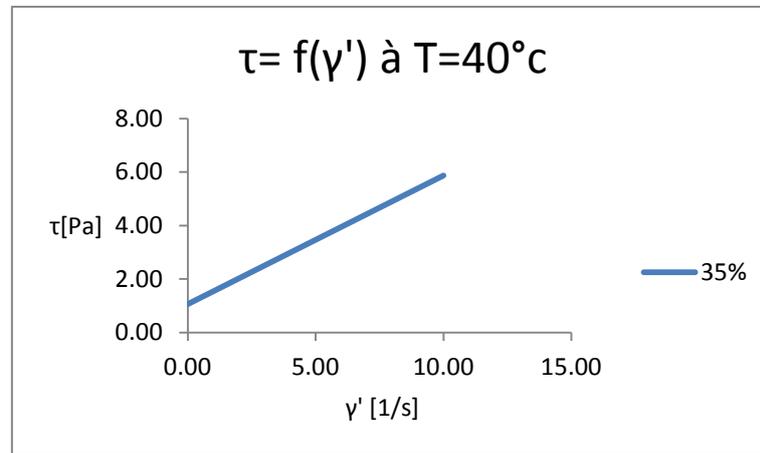


Fig.III.37. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 35 %H

$X_a=0.00$	$y_a=10$
$X_b=1.06$	$Y_b=5.87$
$tg\alpha=0.48$ (Pas.S)	

Tableau.III.23. La viscosité pour35%

B.h. Pour 40%H

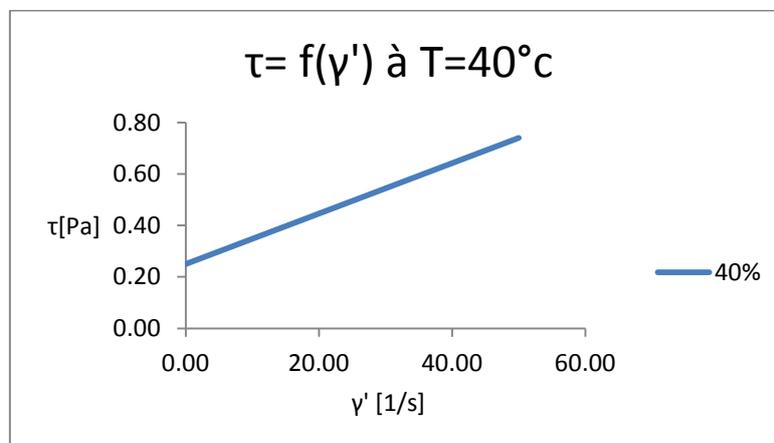


Fig.III.38. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour40 %H

$X_a=0.00$	$y_a=50.00$
$X_b=0.25$	$Y_b=0.74$
tg $\alpha=0.02(\text{Pas.S})$	

Tableau.III.24. La viscosité pour40%

B.i. Pour 100%H

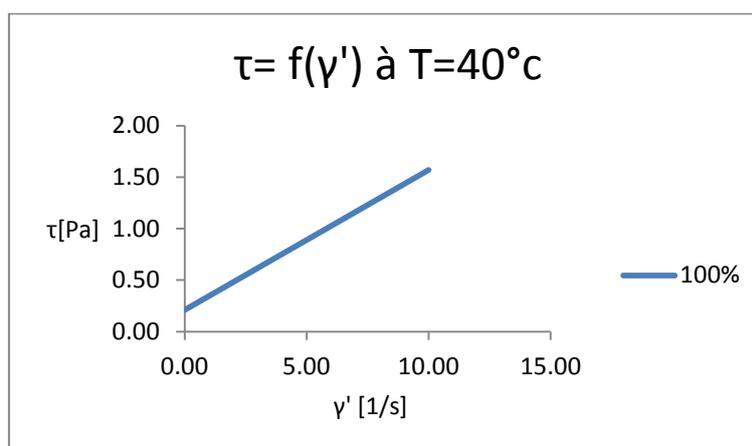


Fig.III.39. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement Pour100 %H

$X_a=0.00$	$y_a=10.00$
$X_b=0.21$	$Y_b=1.57$
tg $\alpha=0.136(\text{Pas.S})$	

Tableau.III.25. La viscosité pour100%

C. $\tau=f(\dot{\gamma})$ à 60°C

C.a. Pour 5%H

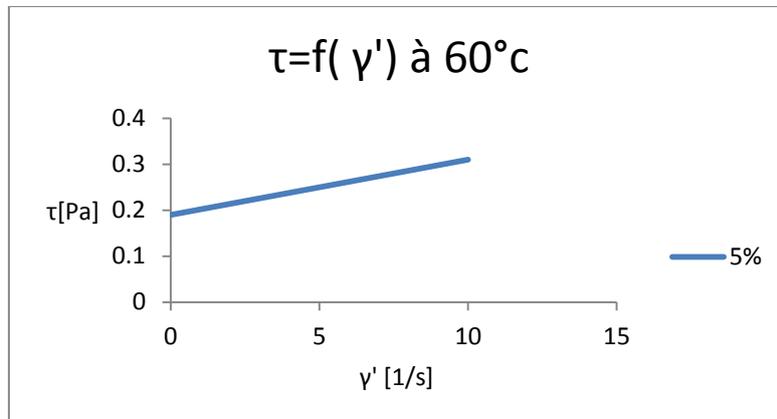


Fig.III.40. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$y_a=0.19$	$Y_b=0.31$
$tg\alpha=0.012(Pas.S)$	

Tableau.III.26. La viscosité pour 5%

C.b. Pour 10%H

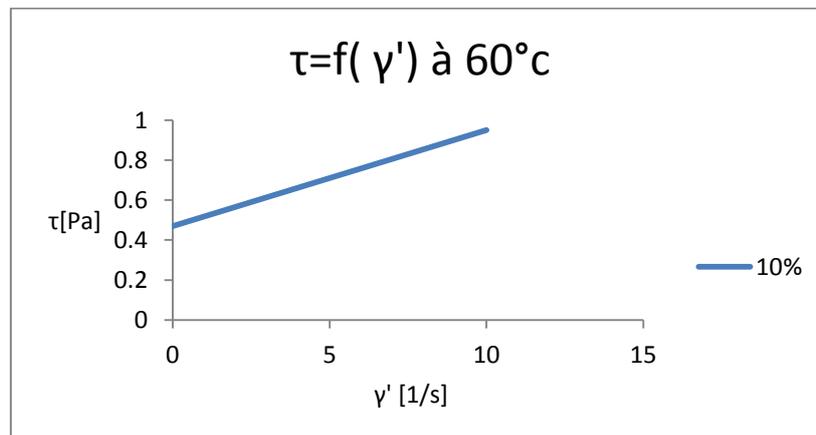


Fig.III.41. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$y_a=0.47$	$Y_b=0.95$
$tg\alpha=0.048(Pas.S)$	

Tableau .27. La viscosité pour 10%

C.c. Pour 15%H

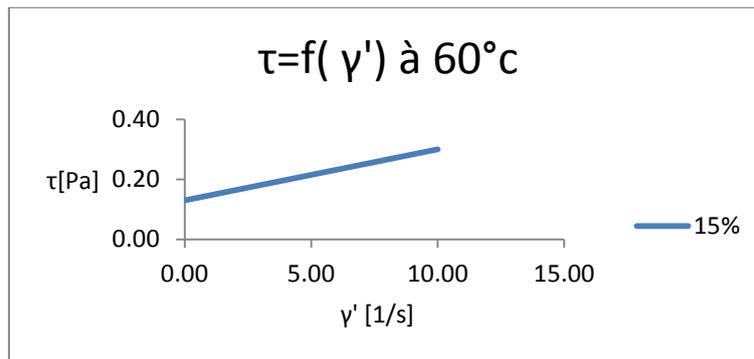


Fig.III.42. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 15%H

$X_a = 0.00$	$X_b = 10.00$
$y_a = 0.13$	$Y_b = 0.30$
$\text{tg}\alpha = 0.017 (\text{Pas.S})$	

Tableau.III.28. La viscosité pour 15%

C.d. Pour 20%H

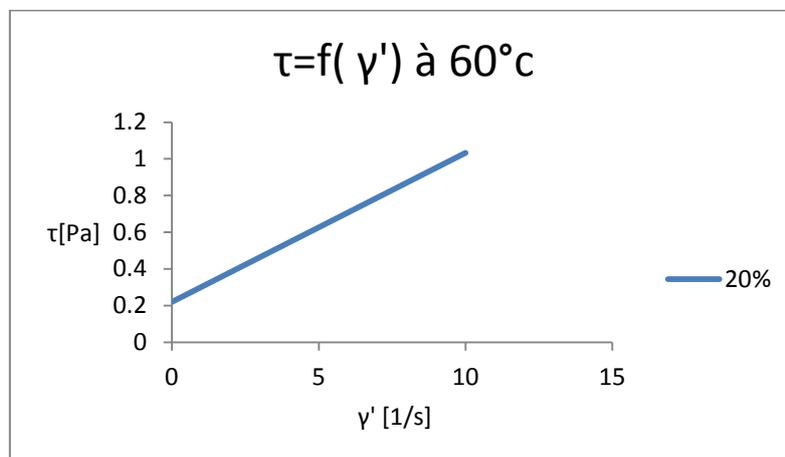


Fig.III.43. Déformation en fonction de la vitesse de rotation pour 20%H

$X_a = 0.00$	$X_b = 10.00$
$y_a = 0.22$	$Y_b = 1.033$
$\text{tg}\alpha = 0.081 (\text{Pas.S})$	

Tableau.III.29. La viscosité pour 20%

C.e. Pour 25%H

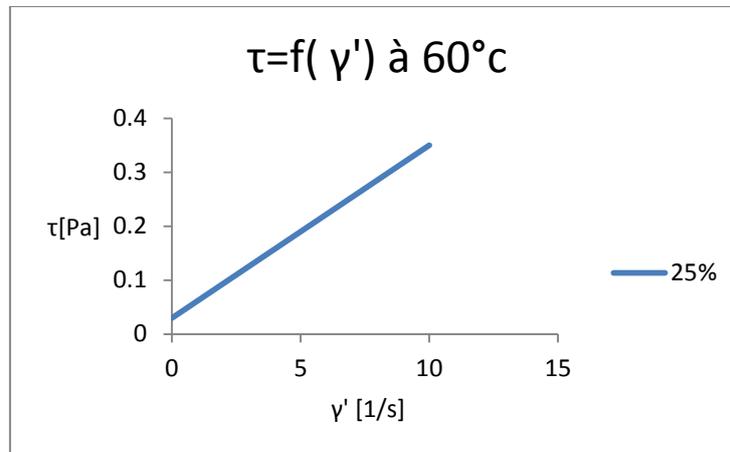


Fig.III.44. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour25%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$y_a=0.03$	$Y_b=0.35$
$\text{tg}\alpha=0.03$	

Tableau.III.30. La viscosité pour25%

C.f. Pour 30%H

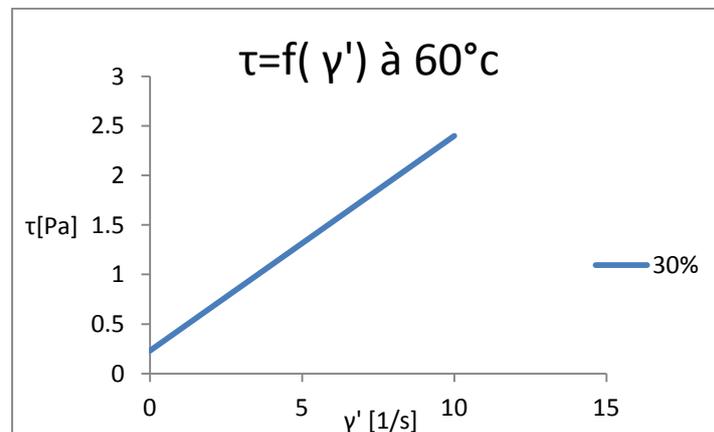


Fig.III.45. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour30%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$y_a=0.23$	$Y_b=2.5$
$\text{tg}\alpha=0.2017$	

Tableau.III.31. La viscosité pour30%

C.g. Pour 35%H

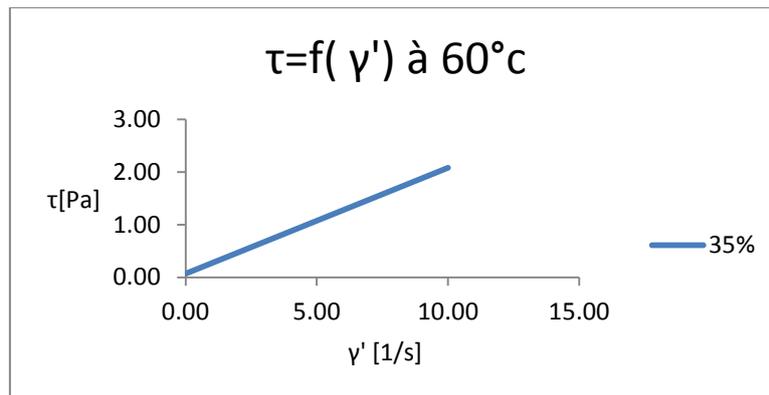


Fig.III.46. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 35%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$y_a=0.07$	$Y_b=2.08$
$\text{tg}\alpha=0.2019$	

Tableau.III.32. La viscosité pour 35%

C.h. Pour 40%H

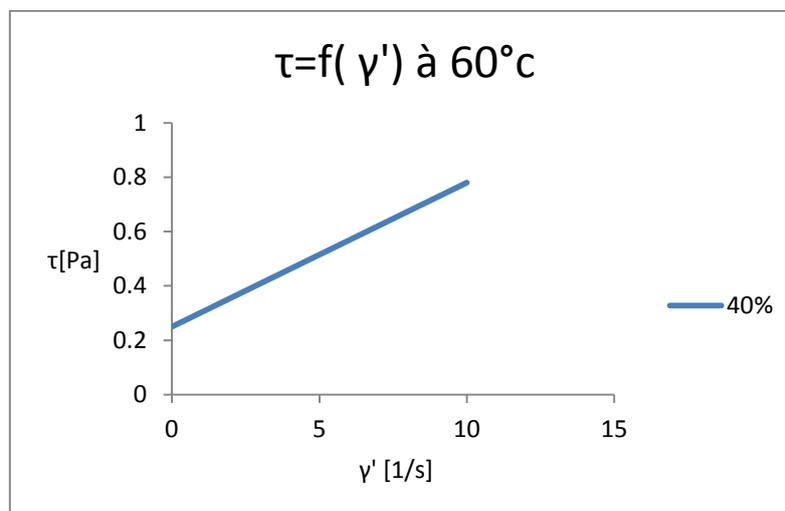


Fig.III.47. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 40%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$y_a=0.25$	$Y_b=0.78$
$\text{tg}\alpha=0.053$	

Tableau.III.33. La viscosité pour 40%

C.i. Pour 100% H

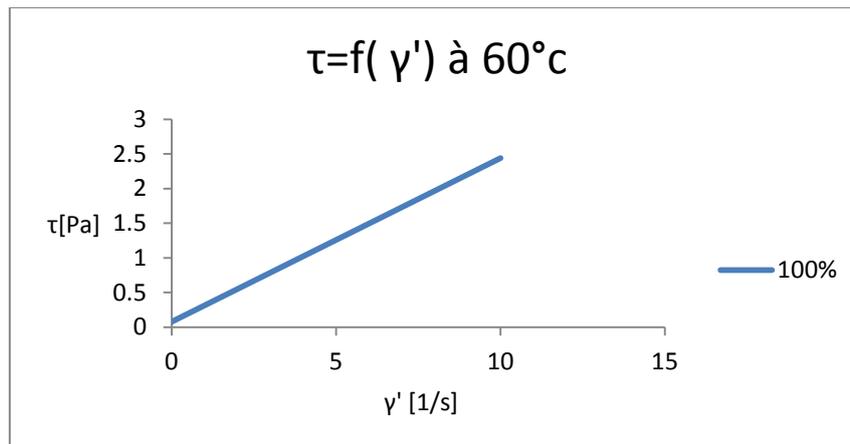


Fig.III.48. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 100% H

$X_a = 0.00$	$X_b = 10.00$
$\gamma_a = 0.08$	$\gamma_b = 2.44$
$\text{tg}\alpha = 0.236$	

Tableau.III.34. La viscosité pour 100%

D. $\tau = f(\gamma')$ à 80°C

D.a. Pour 5% H

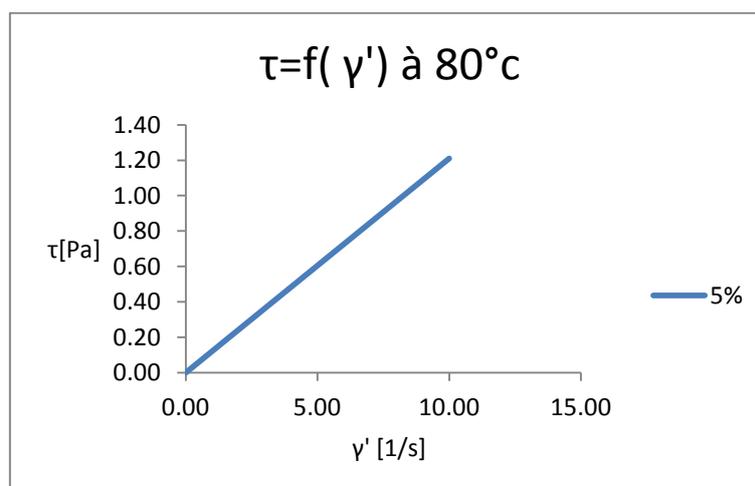


Fig.III.49. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 5% H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$y_a=0.00$	$Y_b=1.21$
$tg\alpha=0.12$	

Tableau.III.35. La viscosité pour 5%

D.b. Pour 10%H

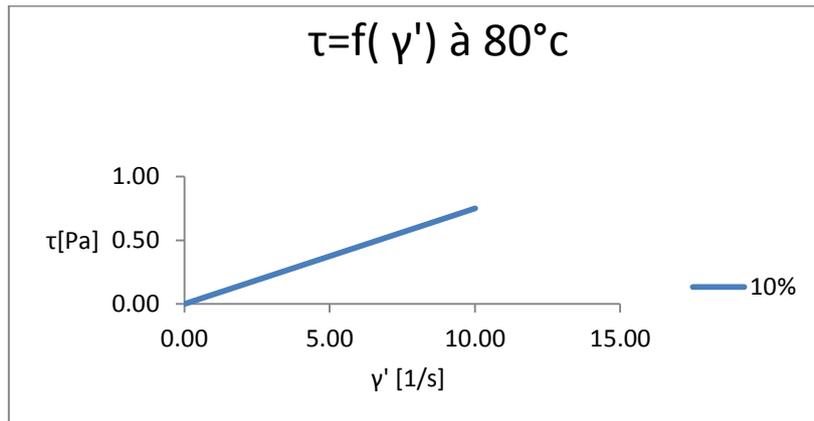


Fig.III.50. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 10%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.01$
$y_a=0.00$	$Y_b=0.75$
$tg\alpha=0.07$	

Tableau.III.36. La viscosité pour 10%

D.c. Pour 15%H

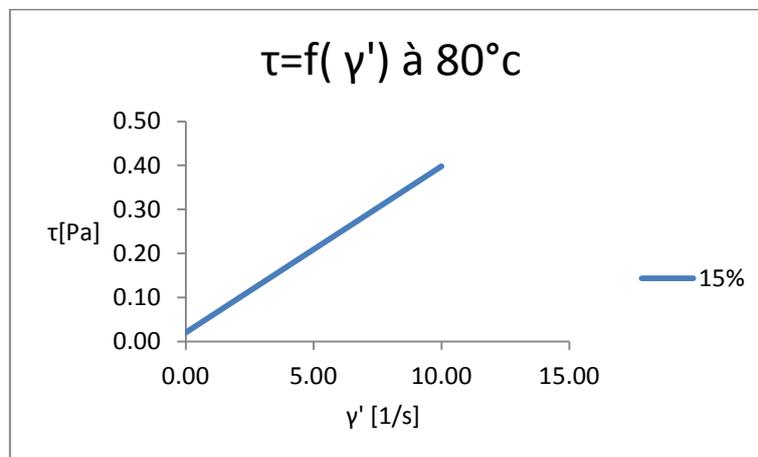


Fig.III.51. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 15%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$\gamma_a=0.02$	$Y_b=0.40$
$\text{tg}\alpha=0.04$	

Tableau.III.37. La viscosité pour15%

D.d. Pour 20%H

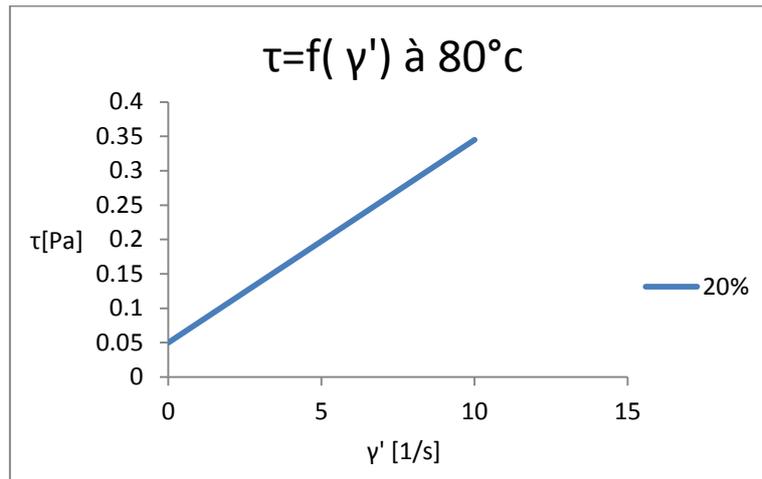


Fig.III.52. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour20%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$\gamma_a=0.05$	$Y_b=0.345$
$\text{tg}\alpha=0.029$	

Tableau.III.38. La viscosité pour20%

D.e. Pour 25%H

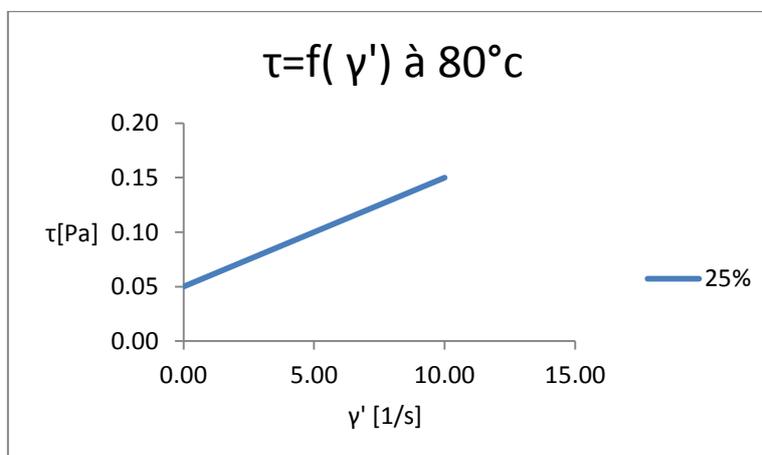


Fig.III.53. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 25%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.00$
$y_a=0.05$	$Y_b=0.15$
$tg\alpha=0.01$	

Tableau.III.39. La viscosité pour 25%

D.f. Pour 30%H

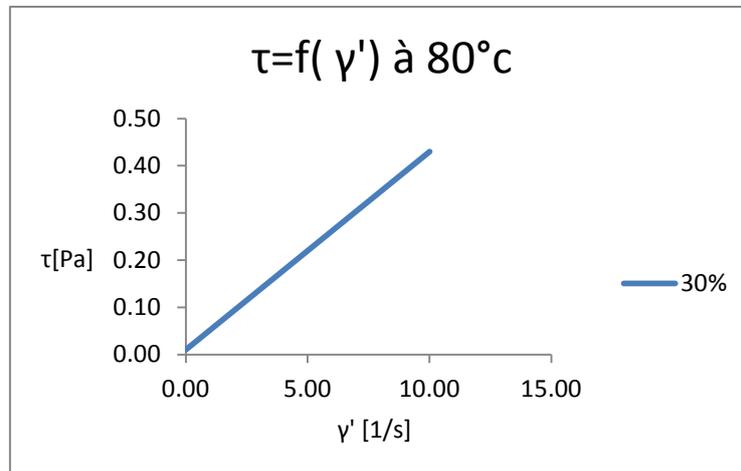


Fig.III.54. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 30%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.01$
$y_a=0.01$	$Y_b=0.43$
$tg\alpha=0.041$	

Tableau.III.40. La viscosité pour 30%

D.g. Pour 35%H

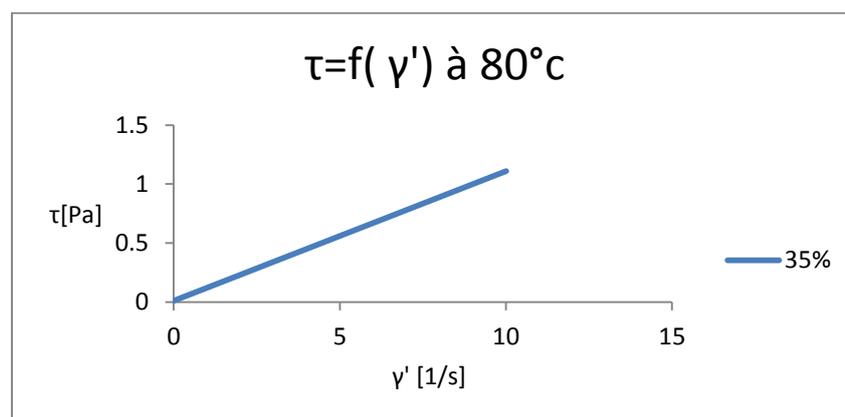


Fig.III.55. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 35%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.01$
$y_a=0.01$	$Y_b=1.11$
$tg\alpha=0.11$	

Tableau.III.41. La viscosité pour35%

D.h. Pour 40%H

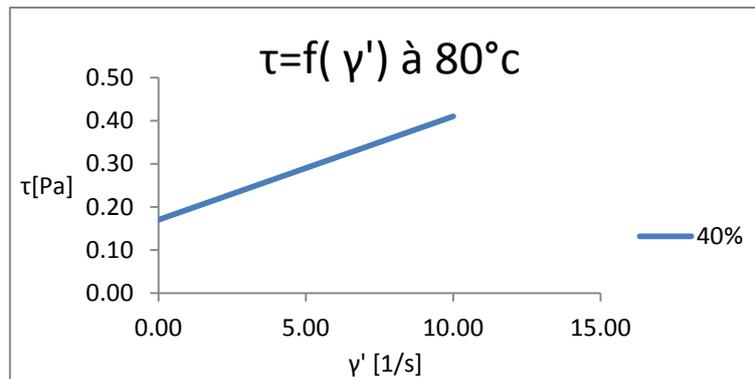


Fig.III.56. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour40%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.01$
$y_a=0.17$	$Y_b=0.41$
$tg\alpha=0.024$	

Tableau.III.42. La viscosité pour40%

D.i. Pour 100%H

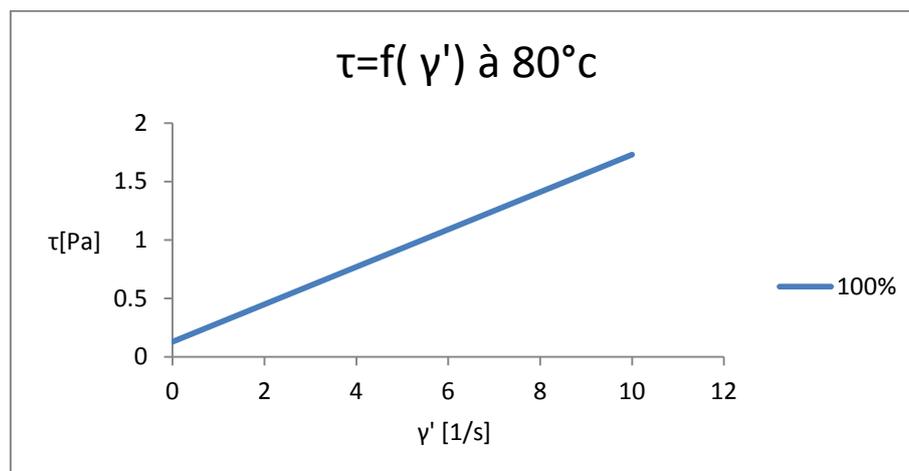


Fig.III.57. Déformation en fonction de la vitesse de cisaillement pour 100%H

$X_a=0.00$	$X_b=10.01$
$y_a=0.13$	$Y_b=1.73$
$tg\alpha=0.16$	

Tableau.III.43. La viscosité pour 100%

E. Analyse de résultats et conclusion :

- le comportement rhéologique de lubrifiant suit toujours le comportement de Bingham

4) Etude de l'Influence de % d'huile ajouté sur les paramètres Rhéologiques de fluide

A. La tangente η en fonction de pourcentage de l'huile

A.a. à 35°C

% huile	$tg\alpha(\text{pas.s})$
5	0.626
10	0.36
15	0.39
20	0.198
25	0.193
30	0.127
35	0.133
40	0.14
100	0.165

Tableau.III.44. La viscosité en fonction du pourcentage de l'huile A 35°C

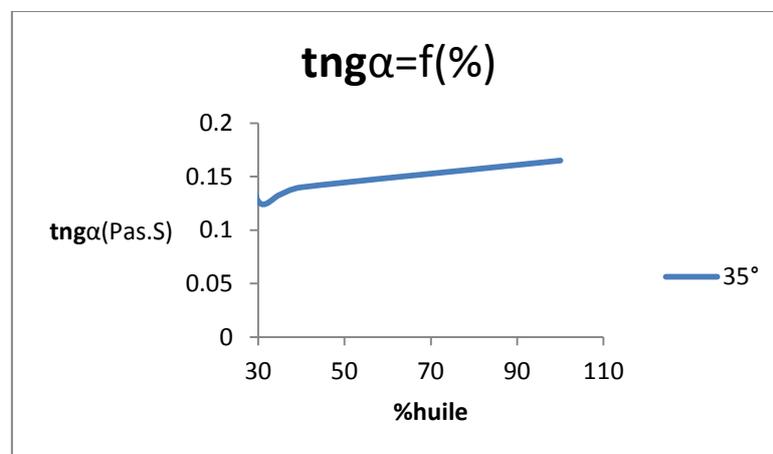


Fig.III.58. La viscosité en fonction du % de l'huile à T=35°C

- La viscosité augmente en fonction de pourcentage d'huile ajouté à l'eau

A.b. à 40°C

% huile	$t_{g\alpha}$ (pas.s)
5	0.33
10	0.05
15	0.01
20	0.02
25	0.18
30	0.01
35	0.48
40	0.02
100	0.136

Tableau.III.45. La viscosité en fonction du pourcentage de l'huile A 40°C

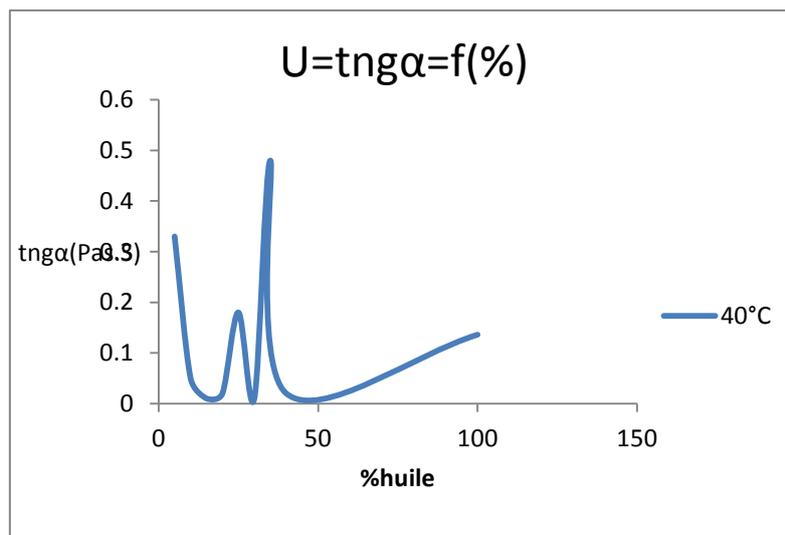


Fig.III.59. La viscosité en fonction du % de l'huile à T=40°C

- La courbe de viscosité en fonction du pourcentage augmente après quelques perturbations.

A.c. à 60°C

% huile	tgα(pas.s)
5	0.01
10	0.048
15	0.017
20	0.081
25	0.03
30	0.2017
35	0.2019
40	0.053
100	0.236

Tableau.III.46. La viscosité en fonction du pourcentage de l'huile A 60°C

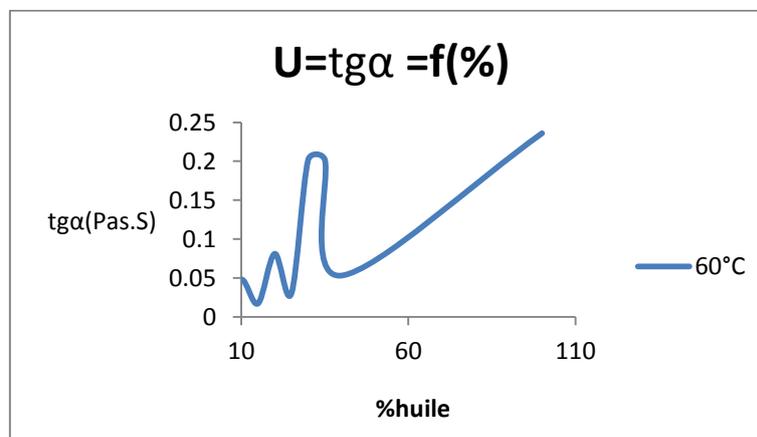


Fig.III.60. La viscosité en fonction du % de l'huile à T=60°C

- La courbe de viscosité en fonction du pourcentage augmente après quelque perturbation.

A.d. à 80°

% huile	tgα(pas.s)
5	0.12
10	0.07
15	0.04
20	0.029
25	0.01
30	0.041
35	0.113
40	0.024
100	0.16

Tableau.III.47. la viscosité en fonction du pourcentage de l'huile A 80°C

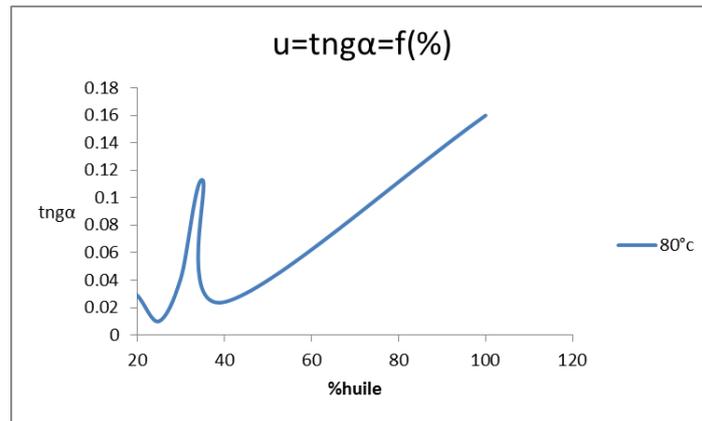


Fig.III.61. La viscosité en fonction du % de l’huile à T=80°C

- La courbe de viscosité(Pas.S) en fonction du pourcentage augmente
 A.e. La viscosité en fonction du pourcentage à différentes températures :

%	Tgα (35°C)	Tgα (40°C)	Tgα (60°C)	Tgα (80°C)
5	0.626	0.33	0.01	0.12
10	0.36	0.05	0.048	0.07
15	0.39	0.01	0.017	0.04
20	0.198	0.02	0.081	0.029
25	0.193	0.18	0.03	0.01
30	0.127	0.01	0.2017	0.041
35	0.133	0.48	0.2019	0.113
40	0.14	0.02	0.053	0.024
100	0.165	0.136	0.236	0.16

Tableau.III.48. La viscosité en fonction des pourcentages à différentes températures

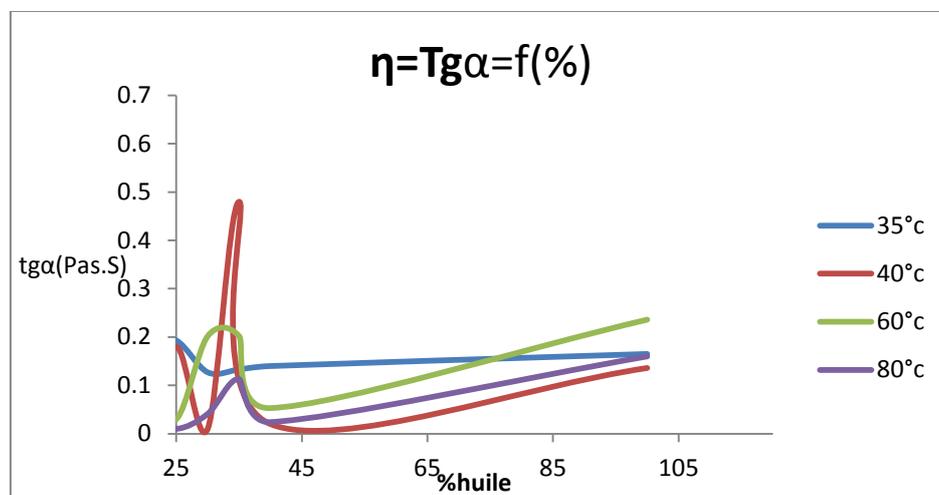


Fig.III.62. La viscosité en fonction du % de l’huile à différentes températures

A.f. Analyse des résultats expérimentaux :

- Les valeurs de tangentes à différentes températures augmentent en fonction du pourcentage. après quelques perturbations

A.g. Conclusion :

- Les perturbations apparaissent dans les cas où le % d'huile ajouté est très faible ce qui complique davantage le suivi expérimental

B. Les seuils en fonction de pourcentage de l'huile

B.a à 35°C

<u>%</u>	<u>z(Pas)</u>
<u>5</u>	<u>2.08</u>
<u>10</u>	<u>1.91</u>
<u>15</u>	<u>0.17</u>
<u>20</u>	<u>3.58</u>
<u>25</u>	<u>0.05</u>
<u>30</u>	<u>0.28</u>
<u>35</u>	<u>0.24</u>
<u>40</u>	<u>0.43</u>
<u>100</u>	<u>0.21</u>

Tableau.III.49. Les seuils en fonction du pourcentage de l'huile à 35°C

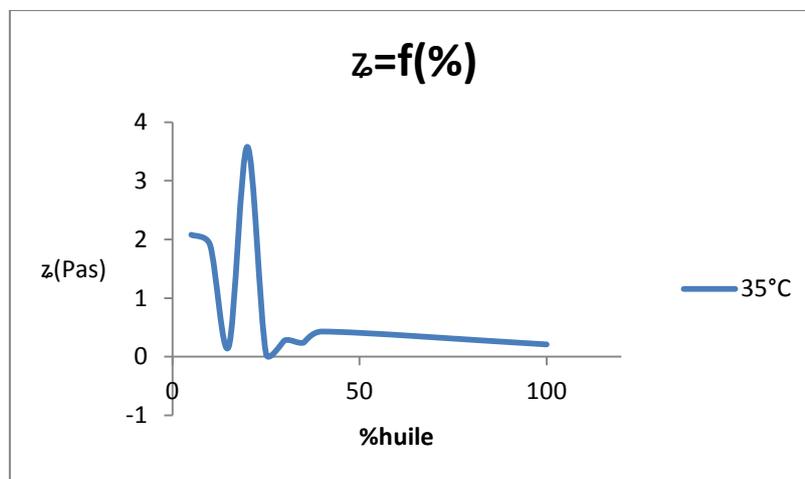


Fig.III.63. La déformation en fonction du % de l'huile à T=35°C

- La courbe de seuil en fonction de pourcentage diminue en amont (25,0.05) et remonte en aval du point (25,0.05), les perturbations sont dues aux manipulations.

B.b à 40°C

<u>%</u>	<u>z(Pas)</u>
<u>5</u>	<u>0.73</u>
<u>10</u>	<u>0.32</u>
<u>15</u>	<u>0.32</u>
<u>20</u>	<u>0.11</u>
<u>25</u>	<u>0.04</u>
<u>30</u>	<u>0.32</u>
<u>35</u>	<u>1.06</u>
<u>40</u>	<u>0.25</u>
<u>100</u>	<u>0.21</u>

Tableau.III.50. Les seuils en fonction du pourcentage de l'huile T=40°C

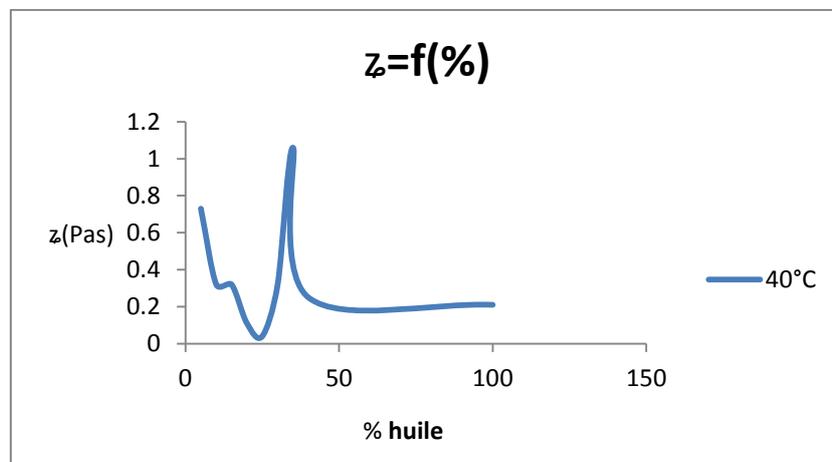


Fig.III.64. Les seuils en fonction du % de l'huile à T=40°C

- La courbe de seuil en fonction de pourcentage diminue en amont (25,0.04) et remonte en aval du point (25,0.05), les perturbations dues à la manipulation.

B.c. à 60°C

<u>%</u>	<u>z</u>
<u>5</u>	<u>0.19(Pas)</u>
<u>10</u>	<u>0.47(Pas)</u>
<u>15</u>	<u>0.13(Pas)</u>
<u>20</u>	<u>0.22(Pas)</u>
<u>25</u>	<u>0.03(Pas)</u>
<u>30</u>	<u>0.23(Pas)</u>
<u>35</u>	<u>0.07(Pas)</u>
<u>40</u>	<u>0.25(Pas)</u>
<u>100%</u>	<u>0.08(pas)</u>

Tableau.51. les seuils en fonction des pourcentages de l'huile à T=60°C

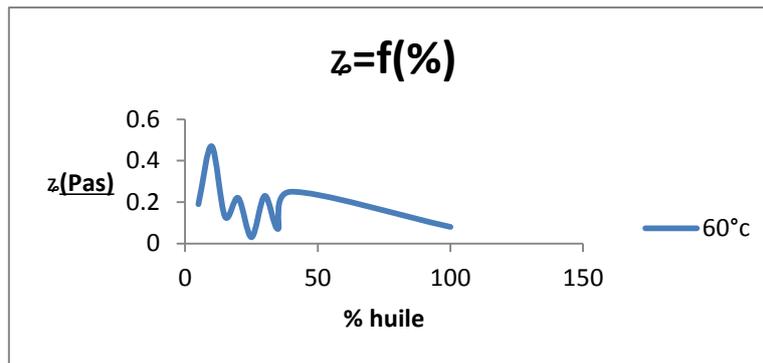


Fig.III.65. Les seuils en fonction du % de l'huile T=60°C

- La courbe de seuil en fonction de pourcentage diminue en amont (25,0.03) et remonte en aval du point (25,0.05) on n'arrive pas à constater à cause des perturbations due à la manipulation. Et de la température élevée 60°C

B.d à 80°C

<u>%</u>	<u>z (Pas)</u>
<u>5</u>	<u>0</u>
<u>10</u>	<u>0</u>
<u>15</u>	<u>0.02</u>
<u>20</u>	<u>0.05</u>
<u>25</u>	<u>0.05</u>
<u>30</u>	<u>0.01</u>
<u>35</u>	<u>0.01</u>
<u>40</u>	<u>0.17</u>
<u>100</u>	<u>0.13</u>

Tableau .52.les seuils en fonction du pourcentage de l'huile A 80°C

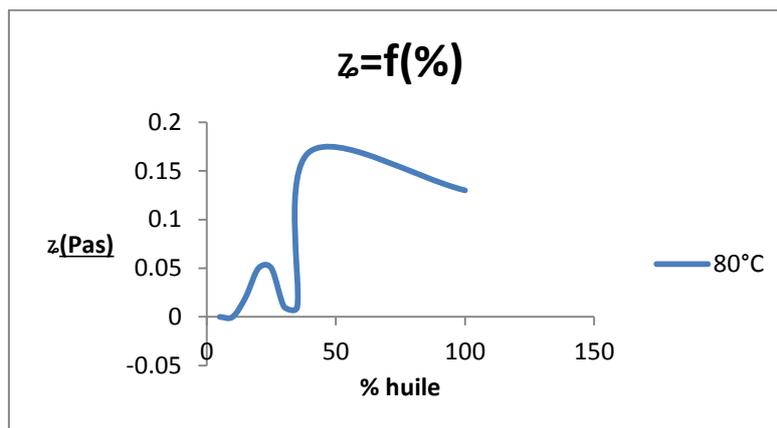


Fig.III.66. Les seuils en fonction du % de l'huile 80°C

- C'est difficile de suivre l'évolution de la déformation à une température élevée 80°C parce que la déformation s'effectue d'une manière rapide.

B.e. Les seuils z en fonction du pourcentage à différentes températures :

%	$z(35^{\circ}\text{C})$	$z(40^{\circ}\text{C})$	$z(60^{\circ}\text{C})$	$z(80^{\circ}\text{C})$
5	2.08	0.73	0.19	0
10	1.91	0.32	0.47	0
15	0.17	0.32	0.13	0.02
20	3.58	0.11	0.22	0.05
25	0.05	0.04	0.03	0.05
30	0.28	0.32	0.23	0.01
35	0.24	1.06	0.07	0.01
40	0.43	0.25	0.25	0.17
100	0.21	0.21	0.08	0.13

Tableau.III.53. les seuils z en fonction du pourcentage à différentes températures

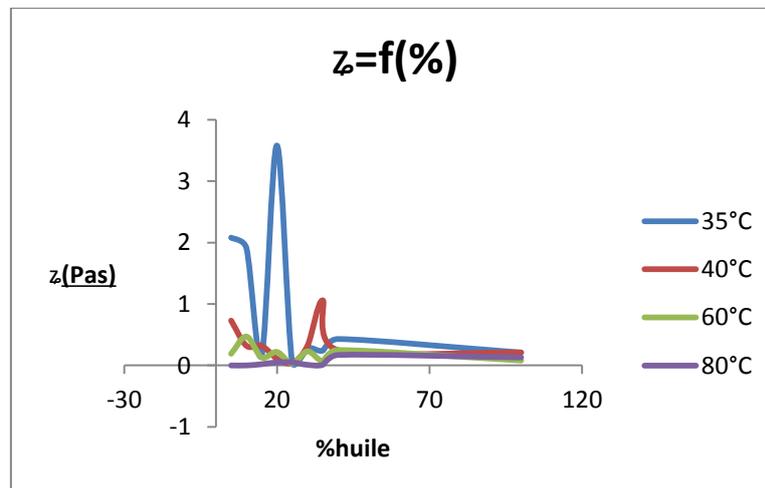


Fig.III.67. Les seuils en fonction du % de l'huile à différentes températures

B.f. Analyse des résultats expérimentaux :

- Les courbes se diminuent en amont du point (25,0.05) et se remontent en aval du même point (point d'intersection).
- Les perturbations sont dues à la précision de manipulation « à 35°C » et l'effet de la température ambiante (climat chaud) l'ordre de la durée de l'expérience.

B.g. Conclusions :

- 25% donne des valeurs de seuils minimale pour les différentes températures étudiées [35-80] °C
- Le z correspondant à l'ajout 25% de l'huile étudiée est égale à une valeur minimale $z = 0.05$ [pascal].

5) Etude de l'Influence de Température sur les paramètres Rhéologiques de fluide

A. La viscosité en fonction de T pour différents pourcentages :

A.a. Pour 5% de l'huile

T(°c)	Tgα(Pas.S)
35	0.626
40	0.33
60	0.012
80	0.12

Tableau.III.54. La viscosité pour 5%

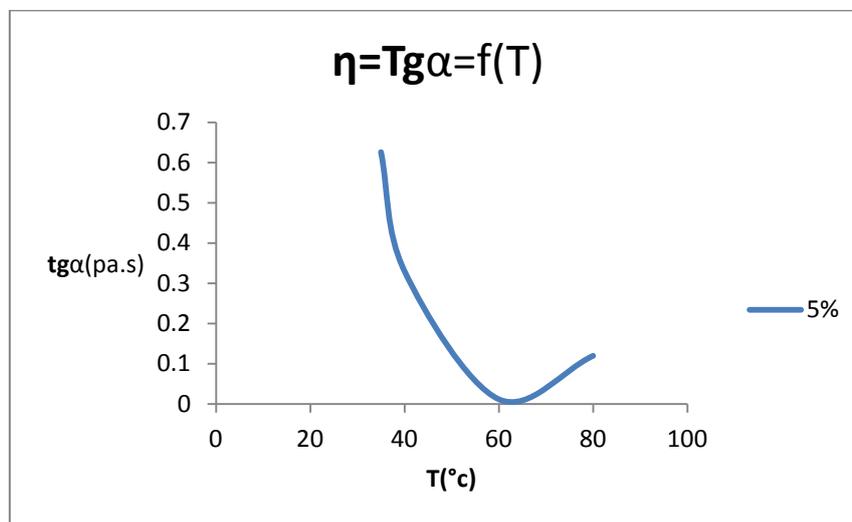


Fig.III.68. La viscosité en fonction de la température pour 5%

A.b. Pour 10% de l'huile

T(°c)	tgα(Pas.S)
35	0.36
40	0.05
60	0.048
80	0.07

Tableau.III.55. La viscosité pour 10%

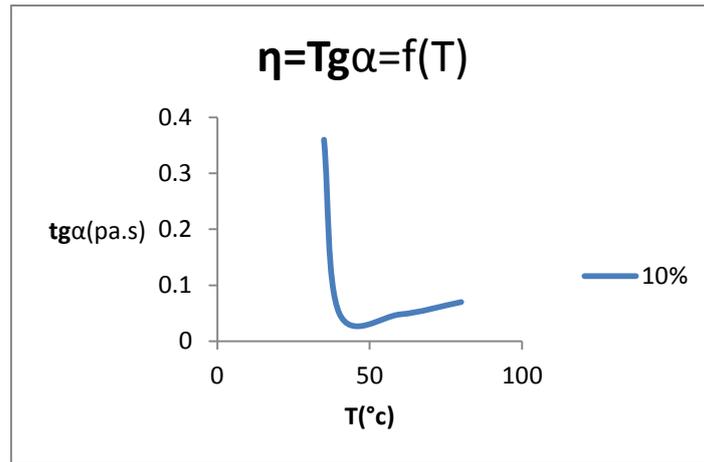


Fig.III.69. La viscosité en fonction de la température pour 10%

A.c.Pour 15% de l'huile

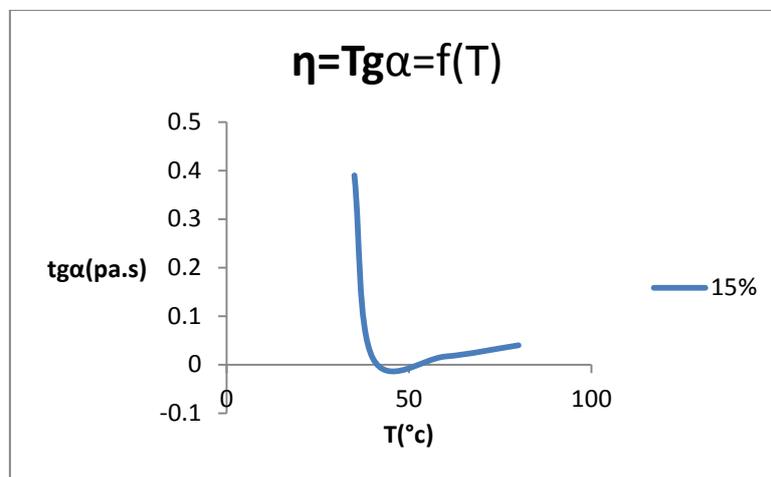


Fig.III.70. La viscosité en fonction de la température pour 15%

T(°c)	tga(Pas.S)
35	0.198
40	0.024
60	0.081
80	0.029

Tableau.III.56. La viscosité pour 15%

- La viscosité diminue en fonction de température, ce résultat corrobore avec la littérature

A.d. Pour 20% de l'huile

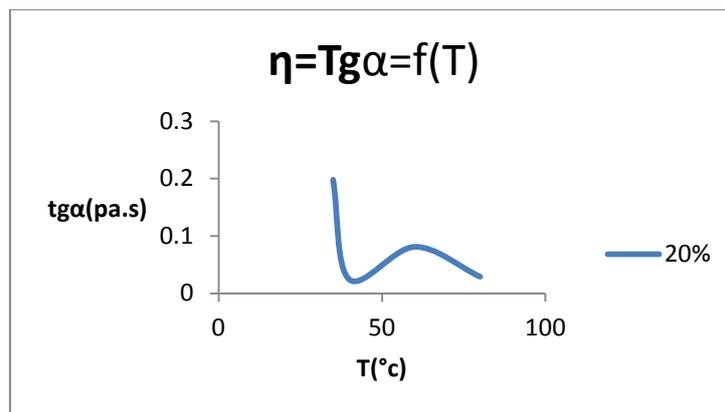


Fig.III.71. La viscosité en fonction de la température pour 20%

T(°c)	tgα(Pas.S)
35	0.198
40	0.024
60	0.081
80	0.029

Tableau.III.57. La viscosité pour 20%

- On remarque que La viscosité diminue en fonction de la température, et l'augmentation à 60°C peut être due aux erreurs de manipulations.

A.e. Pour 25% de l'huile

T(°c)	tgα(Pas.S)
35	0.193
40	0.186
60	0.03
80	0.01

Tableau.III.58. La viscosité pour 25%

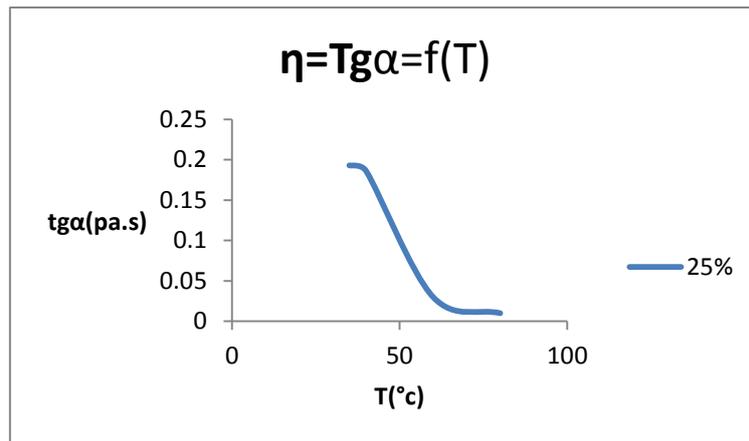


Fig.III.72. La viscosité en fonction de la température pour 25%

- La viscosité diminue progressivement en fonction de la température

A.f. Pour 30% de l'huile

T(°c)	tgα(Pas.S)
35	0.127
40	0.012
60	0.2
80	0.041

Tableau.III.59. La viscosité pour 30%

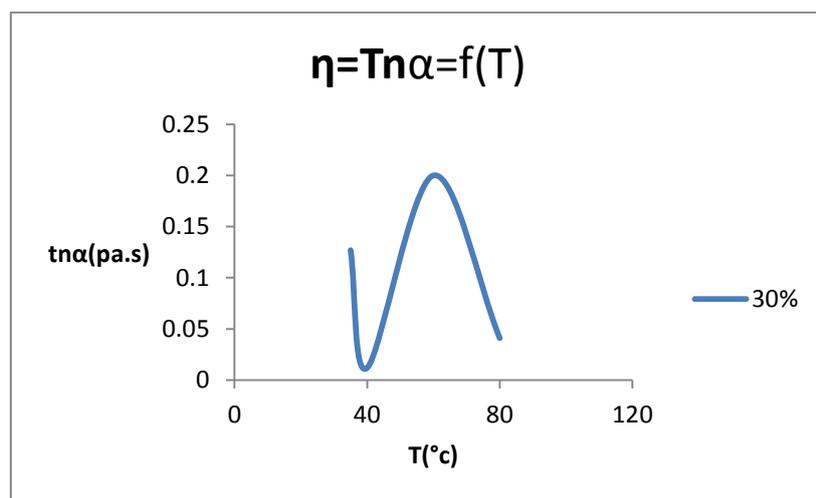


Fig.III.73. La viscosité en fonction de la température pour 30%

- La viscosité diminue à la température finale Tmax par rapport à la température initial Tmin
- Les piques correspondent peut être aux erreurs manipulations.

A.g. Pour 35% de l'huile

T(°c)	tgα(Pas.S)
35	0.133
40	0.48
60	0.2019
80	0.113

Tableau.III.60. La viscosité pour 35%

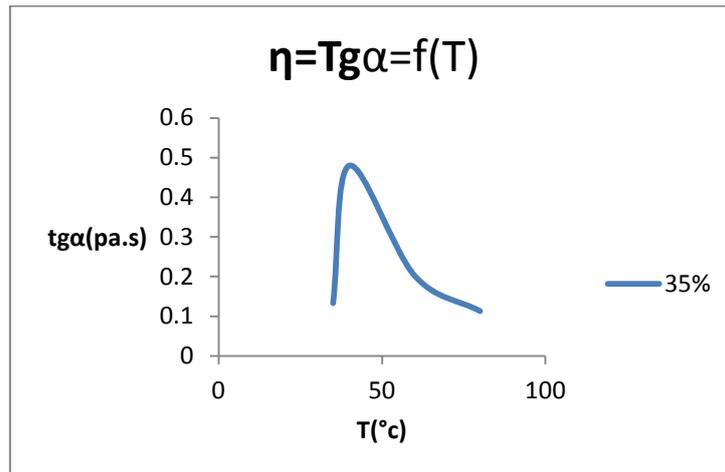


Fig.III.74. La viscosité en fonction de la température pour 35%

A.h. Pour 40% de l'huile

T(°c)	tgα(Pas.S)
35	0.14
40	0.02
60	0.053
80	0.024

Tableau.III.61. La viscosité pour 40%

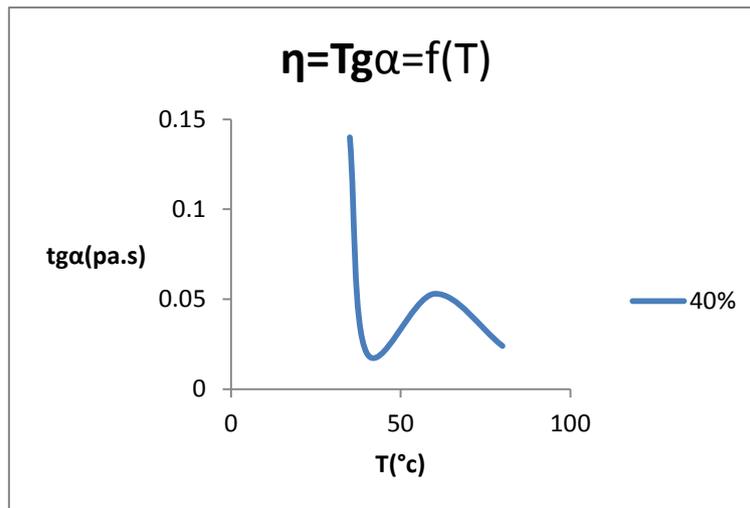


Fig.III.75. La viscosité en fonction de la température pour 40%

- La viscosité diminue en fonction de la température

A.iPour 100% de l'huile

T(°c)	tgα(Pas.S)
35	0.16
40	0.136
60	0.2
80	0.1

Tableau.III.62. La viscosité pour 100%

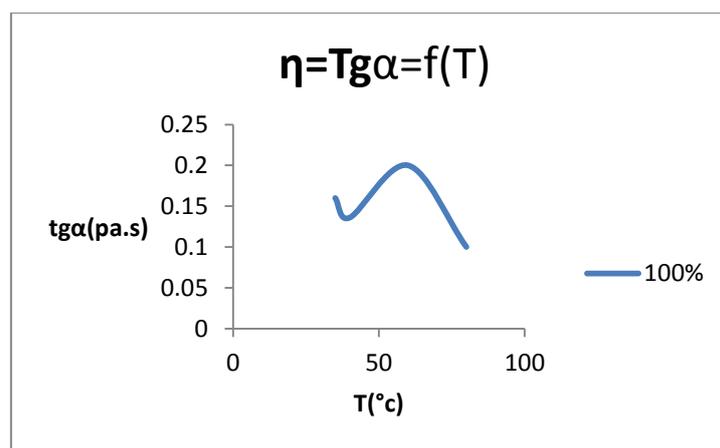


Fig.III.76. La viscosité en fonction de la température pour 100%

- La viscosité diminue en fonction de la température
- Avec l'ajout de 100% d'huile le mélange devient pâteux, avec l'augmentation de la température le mélange passe de l'état pâteux à l'état liquide ce qui justifie l'augmentation de viscosité à la faible température et la diminution aux grandes températures

A.j. La viscosité en fonction de la Température pour tous les mélanges :

T/%	U (5%)	U (10%)	U (15%)	U (20%)	U (25%)	U (30%)	U (35%)	U (40%)	U (100%)
35	0.626	0.36	0.39	0.198	0.193	0.127	0.133	0.14	0.16
40	0.33	0.05	0.014	0.024	0.186	0.012	0.48	0.02	0.136
60	0.012	0.048	0.017	0.081	0.03	0.2017	0.2019	0.053	0.2
80	0.12	0.07	0.04	0.029	0.01	0.041	0.113	0.024	0.1

Tableau.III.63. La viscosité en fonction de la température pour tous les mélanges

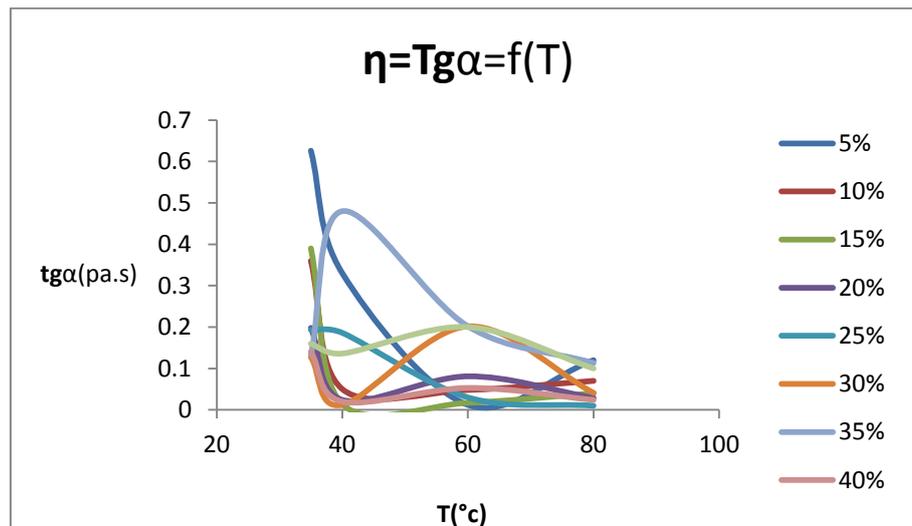


Fig.III.77. La viscosité en fonction de la température pour les différents %

A.k. Analyse de résultats expérimentaux :

- La viscosité diminue en fonction de la température pour tous les mélanges.
- La viscosité diminue progressivement pour le mélange 25%.
- Les courbes $u=f(T)$ supérieures à la courbe de 25% sont au-dessus de cette dernière.
- Les courbes $u=f(T)$ inférieures à la courbe de 25% sont au-dessous de cette dernière.

A.l. Conclusion :

- La viscosité diminue en fonction de la température pour tous les mélanges ce qui est en concordance avec la théorie.
 - La viscosité diminue progressivement et très proche à la courbe idéale pour le mélange 25%
 - Les courbes $U=f(T)$ qui se trouvent au-dessus représentent bien des mélanges à haute viscosité et corrobore à la littérature.
 - Les courbes $U=f(T)$ qui se trouvent au-dessous représentent bien des mélanges à faible viscosité corrobore à la littérature.
- ✓ **z est la contrainte minimale qu'il faut exercer sur le liquide pour le déformer, la suite de ce travail consiste à étudié sur l'évolution avec le changement de la température**

B. z en fonction de la température

B.a. Pour 5% de l'huile

T(°c)	z (Pas)
35	2.08
40	0.73
60	0.19
80	0

Tableau.III.64. La viscosité pour 5%

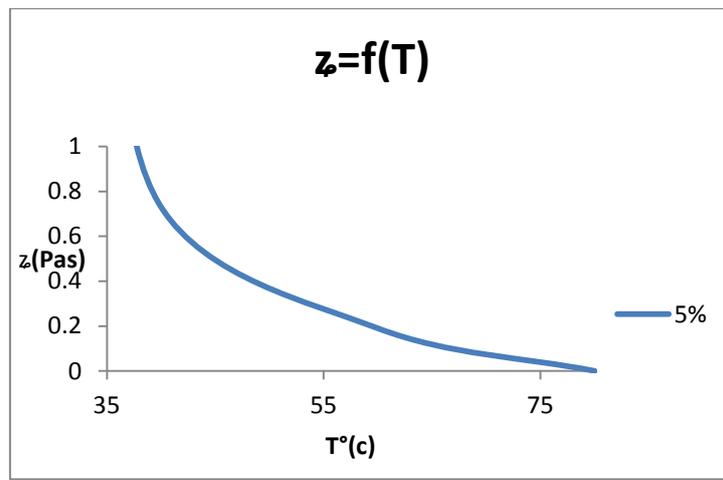


Fig.III.78. Les seuils en fonction de la température pour 5%H

- La courbe de seuil de déformation diminue progressivement en fonction de la température.

B.b Pour 10% de l'huile

T(°c)	z (Pas)
35	1.91
40	0.32
60	0.47
80	0

Tableau.III.65. La viscosité pour 10%

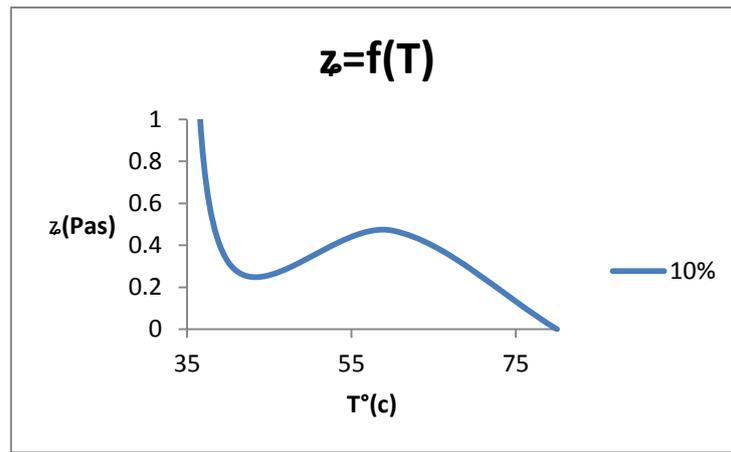


Fig.III.79. Les seuils en fonction de la température pour 10%H

- La courbe de seuil de déformation diminue en fonction de la température avec des petites perturbations.

B.c. Pour 15% de l'huile

T(°C)	z(Pas)
35	0.17
40	0.32
60	0.13
80	0.02

Tableau.III.66.La viscosité pour15%

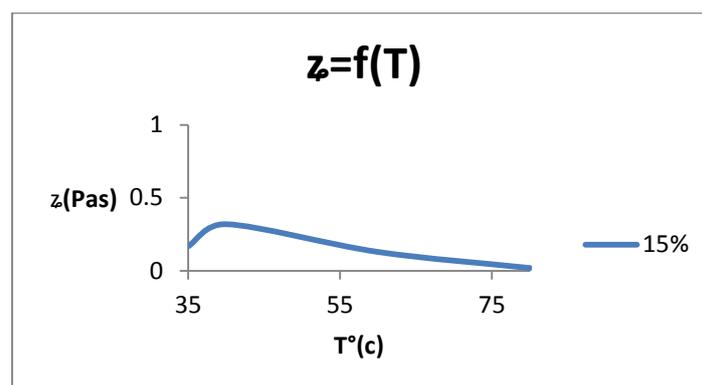


Fig.III.80. Les seuils en fonction de la température pour 15%H

- La courbe de seuil de déformation diminue en fonction de la température et commence à se stabiliser.

B.d. Pour 20% de l'huile

T(°c)	z(Pas)
35	3.58
40	0.11
60	0.22
80	0.05

Tableau.III.67.La viscosité pour 20%

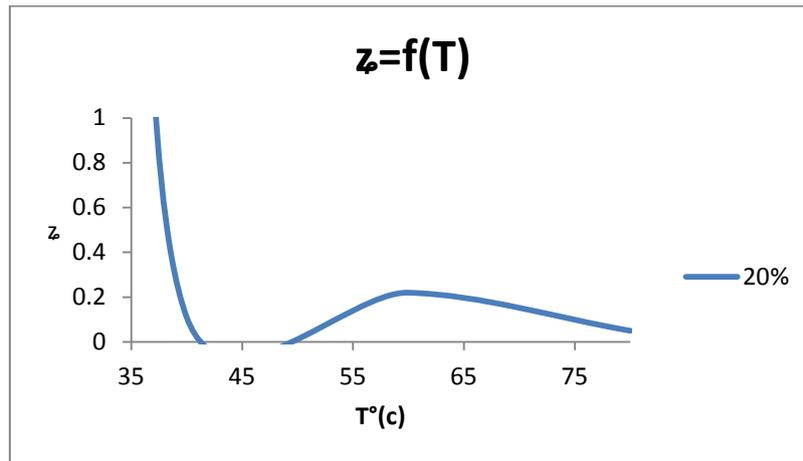


Fig.III.81. Les seuils en fonction de la température pour 20%H

- La courbe de seuil de déformation diminue en fonction de la température et commence à stabiliser à partir de grande température.

B.e. Pour 25% de l'huile

T(°c)	z(Pas)
35	0.05
40	0.04
60	0.03
80	0.05

Tableau.III.68.La viscosité pour 25%

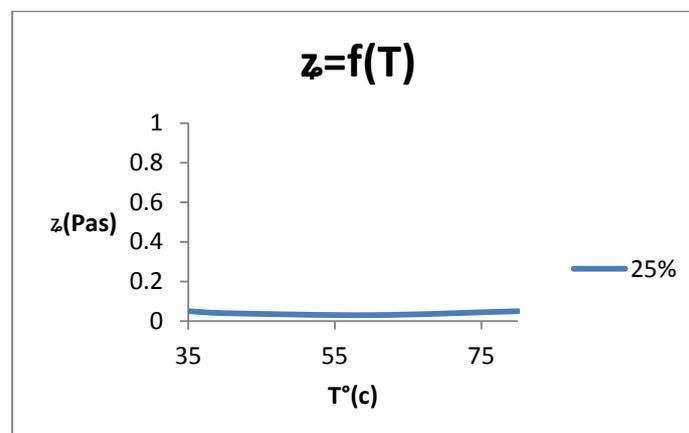


Fig.III.82. Les seuils en fonction de la température pour 25%H

- La courbe de seuil de déformation est très stable sur toute l'échelle de la température et sa valeur est comprise entre 0.03 et 0.05 pascal

B.f. Pour 30% de l'huile

T(°c)	z(Pas)
35	0.28
40	0.32
60	0.23
80	0.01

Tableau.III.69.La viscosité pour30%

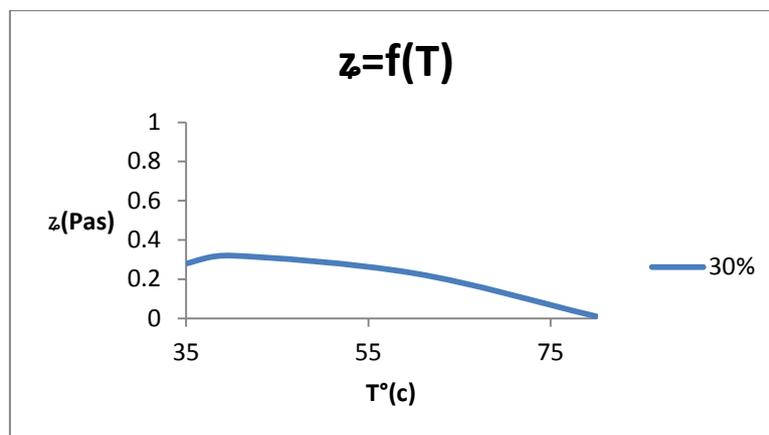


Fig.III.83. Les seuils en fonction de la température pour 30%H

- La courbe de seuils de déformations diminue en fonction de la température.

B.g. Pour 35% de l'huile

T(°c)	z(Pas)
35	0.24
40	1.06
60	0.07
80	0.01

Tableau.III.70. La viscosité pour35%

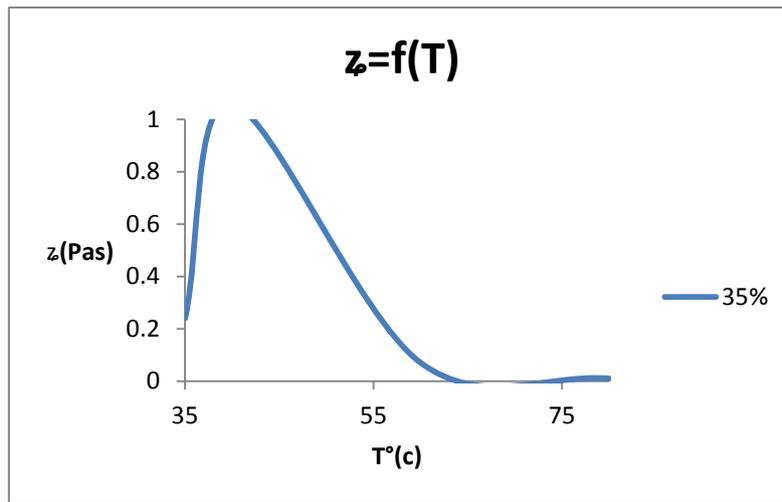


Fig.III.84. Les seuils en fonction de la température pour 35%H

B.h. Pour 40% de l'huile

$T(^{\circ}\text{c})$	$z(\text{Pas})$
35	0.43
40	0.25
60	0.25
80	0.17

Tableau.III.71. La viscosité pour 40%

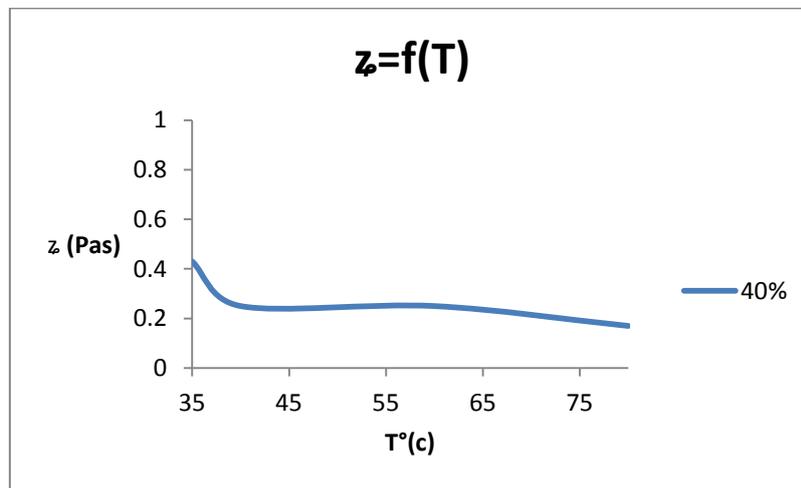


Fig.III.85. Les seuils en fonction de la température pour 40%H

- La courbe de diminutions de seuils est stable avec des grandes valeurs de seuils de déformations

B.i. Pour 100% de l'huile

T(°c)	z(Pas)
35	0.21
40	0.21
60	0.08
80	0.13

Tableau.III.72. La viscosité pour 100%

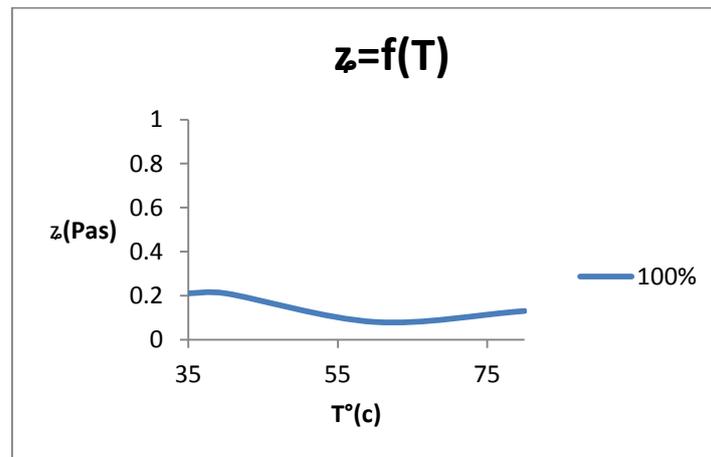


Fig.III.86. Les seuils en fonction de la température pour 100%H

- Le seuil de cisaillement est stable mais avec des grandes valeurs de seuils de déformations.

B.j. Le seuil en fonction du Températures pour tous les mélanges :

T/%	z(5%)	z(10%)	z(15%)	z(20%)	z(25%)	z(30%)	z(35%)	z(40%)	z(100%)
35	2.08	1.91	0.17	3.58	0.05	0.28	0.24	0.43	0.21
40	0.73	0.32	0.32	0.11	0.04	0.32	1.06	0.25	0.21
60	0.19	0.47	0.13	0.22	0.03	0.23	0.07	0.25	0.08
80	0	0	0.02	0.05	0.05	0.01	0.01	0.17	0.13

Tableau.III.73. Les seuils en fonction de la température pour les différents pourcentages

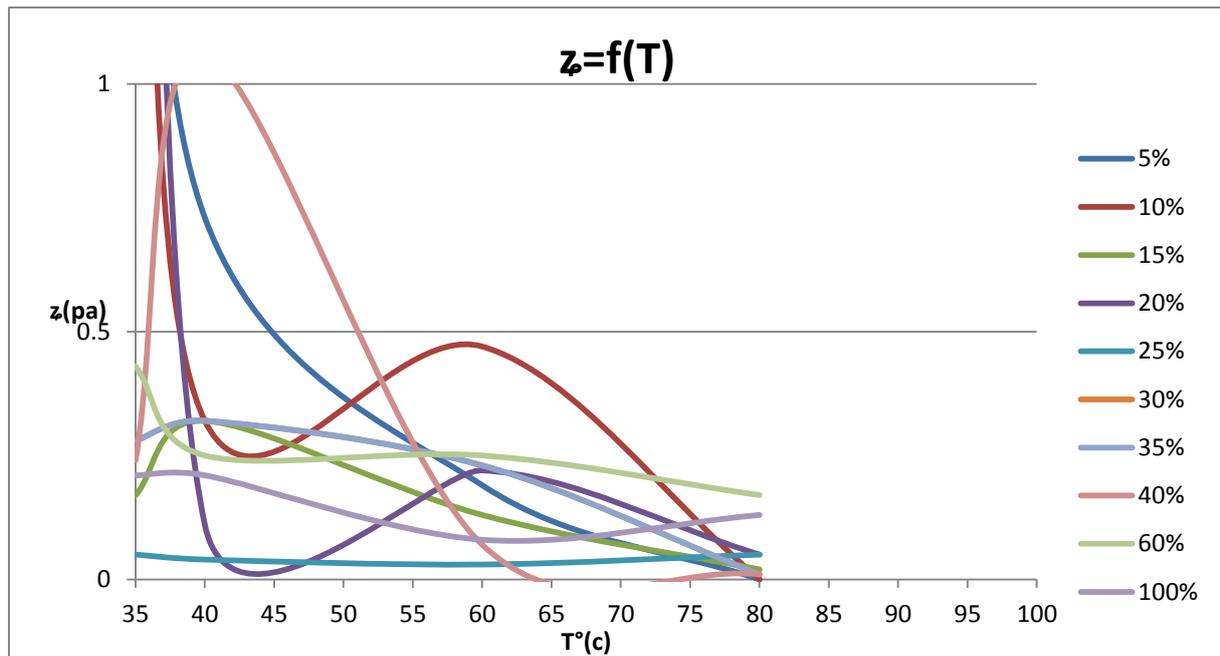


Fig.III.87. Les seuils en fonction de la température pour les différents pourcentages

B.k. Analyse des résultats expérimentaux :

- La courbe de seuil de déformation est très stable en fonction de la température pour le pourcentage d'huile 25%.
- La courbe de seuil de déformation est moins stable par rapport au mélange 25% pour les mélanges 60% et 100% respective.
- Les courbes de seuils de déformations diminuent en fonction de la température pour tous les autres pourcentages d'huile ajoutée.
- $z(25\%) < z(20\%)$ (20% considéré idéal par le constructeur).
- Les valeurs de seuils de déformations est inférieure pour le mélange 25% par rapport aux valeurs de seuils de déformations de mélanges 60% ,100% respective ; et $z(25\%) < z(60\%)$ et $z(25\%) < z(100\%)$

B.l. Conclusion :

- $z(25\%) < z(20\%) \Rightarrow$ 25% est facile à déformer (le caractéristique principale d'un lubrifiant est de facilité à se déformer

d'après les graphes de $U=f(T)$ $z=f(T)$,le taux de 25% et mieux de 20% donné par le constructeur cela à cause de la stabilité du z et de la diminutions de la viscosité U en fonction de la température.

• CONCLUSION :

D'après notre étude expérimentale dans ce chapitre 3 sur le mélange étudié (huile eau)

On à trouver que :

1. Le comportement rhéologique du fluide suit une loi rhéologique de type Bingham suivant l'équation $\tau = z + \dot{\gamma}U$
2. La viscosité apparente à différentes températures augmente en fonction du pourcentage.
3. 25% donne des valeurs de seuils minimale pour les différentes températures étudiées [35-80] °c
4. La viscosité apparente diminue en fonction de la température ce qui est en concordance avec la théorie.
5. $z(20\%)$ est stable par rapport à la température ce qui en concordance avec la théorie.
6. $z(25\%) < z(20\%) = 0.05$ pascal => à 25% est facile à déformer (le caractéristique principale d'un lubrifiant est de facilité à se déformer

Le thème de notre sujet de fin de cycle est « L'influence de la température et du pourcentage d'huile ajouté sur les paramètres rhéologiques des huiles de coupe ».

L'importance de ce type d'huile de coupe se traduit par son efficacité de lubrifier et au même temps de minimiser le produit, et de son adaptation avec les différentes températures aux quelles les huiles de coupe solubles (fluides complexes solubles dans l'eau) sont soumises. De plus elles répondent aux exigences de protection des appareils utilisés. Ces raisons ont guidé notre choix vers l'étude de ce type de l'huile.

D'après les résultats expérimentaux on a constaté qu'il y'a une relation entre les paramètres rhéologiques intrinsèques du fluide utilisé, avec la température et le pourcentage des ajouts utilisés.

Ces résultats, nous permettent d'affirmer que :

- Le comportement des huiles de coupe est de type fluide complexe avec seuil d'écoulement type BINGHAM.
- La température est inversement proportionnelle à la viscosité, ce qui est déjà observé dans la littérature.
- L'ajout de 25% d'huile correspond à la configuration optimale, différente à celle donnée par le constructeur.
- La configuration optimale, correspond à la stabilité des caractéristiques rhéologiques intrinsèques en fonction de l'élévation de la température.

Quelques interrogations restent toujours à poser à savoir les perturbations constater l'or des essais.

Nous proposons comme perspectives de faire des recherches plus approfondies pour expliquer et donner une réponse à ces interrogations.

- [1].BIERLA A.; Réactions usinage des aciers prétraités à l'huile entière -effets physico-chimiques des additifs soufres ; **2009. (Fichier PDF)**
- [2].COUDRE C. ; Méthodes de Maintenance; **2011. (Ouvrage en PDF)**
- [3].GAILLOT S. ; Préconisation pour la maîtrise des risques chimique et biologiques ; **2017. (Fichier PDF)**
- [4]. D.S.C. SACRE-CŒUR. ; Équipe de sante au travail, travailleurs exposes aux brouillards et fluides de coupe ou de refroidissement;**1983. (Fichier PDF)**
- [5]. <https://www.directlub.com/lubrifiant-industriel/huile-soluble.html>
D'évaporation; application aux fluides de coupe usées de l'industrie mécanique. ; **2013. (Fichier PDF, site associé)**
- [6].<https://www.geant-beaux-arts.fr/huile-de-lin-soluble-dans-l-eau-daler-rowney.html>
(Fichier PDF, site associé)
- [7].JEDRZEJAK S.; Développement d'une méthodologie d'une sélection intégrée des procédés d'évaporation : application aux fluides de coupe usée de l'industrie mécanique ; **2013. (Fichier PDF, site associé)**
- [8]. <http://tpmattitude.fr/lubrification.html> **(Fichier PDF, site associé)**
- [9].Société énergétique Eni France ENI.COM **(entreprise française, site web associé)**
- [10].WIKEPEDIA **(encyclopédie en ligne)**
- [13].« FLUIDE COMPLEXE » de Mr A Ouibrahim, Pr ummto **(cours universitaires)**
- [14].www.geoazur.fr/PERSO/hassani/RiadHassani/...files/Element_de_rheologie.pdf **(cours universitaires fichier PDF site web associé)**
- [17].Claude Verdier Directeur de Recherche C.N.R.S. Laboratoire Interdisciplinaire de Physique - L'Imphy, CNRS – Université de Joseph Fourier (Grenoble I) **(cours universitaires fichier PDF)**
- [19].Etude rhéologique et hydraulique de circuit de boue dans une installation de forage MR hadj ALI Jugurtha dirigé par MR HADID Md Rachid **2011/2012. (Mémoire de fin d'étude en énergétique UMMTO).**
- [16].Relations entre les propriétés rhéologiques et adhésives des matériaux colles (mortiers) dirigé par Mr Bouras réalisé par Kaci Lynda et sellami Nacera **2014-2015. (Mémoire de fin d'étude en énergétique UMMTO)**
- [11].Initiation à la rhéologie cote : MDF32 bibliothèque département mécanique UMMTO **(ouvrage)**
- [15].Le lubrifiant véritable matériau de construction CETIM : centre Technique des industries Mécaniques cote : CM56 bibliothèque département mécanique UMMTO **(ouvrage)**
- [18].Les propriétés rhéologiques des lubrifiants MDF14 bibliothèque département mécanique UMMTO **(ouvrage)**
- [12].N.Vandewalle, Professeur Ordinaire, Université de Liège **(cours universitaires fichier PDF)**
- [20].Manuel d'utilisation Thermo Fisher Scientific-Material characterization www.thermo.com/mc **(Fichier PDF, site internet associé)**