

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE



*Ecole nationale polytechnique*

*Département de Génie chimique*

Projet de fin d'études

Thème

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

*Etablissement de nouvelles règles de mélanges pour le calcul des propriétés physiques des mélanges d'hydrocarbures*

Proposé par :  
Pr: C.E.CHITOUR

suivi par :  
Pr :C.E CHITOUR  
M<sup>elle</sup> :N.SKANDER

Réalisé par :  
Berradj Omar



ENP 10, Avenue Hacène Badi El-HARACH-ALGER

# Dedicace

A tous ceux qui militent pour que la souveraineté des idées soit  
restaurée dans notre univers culturel,  
Je dédie ce modeste travail.

Omar

## Etablissement de nouvelles règles de mélanges pour le calcul des propriétés physiques des mélanges d'hydrocarbures

### RESUME

Notre travail consiste à élaborer des nouvelles règles de mélanges pour la prédiction des propriétés physiques des mélanges d'hydrocarbures. Pour cela nous avons mesuré expérimentalement la densité, l'indice de réfraction, la viscosité, la tension superficielle et le point d'aniline pour une soixantaine de mélanges binaires et ternaires, puis nous avons essayé de retrouver les mêmes propriétés en appliquant des règles de mélanges classiques tel que la moyenne arithmétique, géométrique, cubique, logarithmique et harmonique et aussi des corrélations de la littérature.

Les nouvelles règles de mélanges établies sont basées sur l'amélioration des règles classiques en introduisant des termes correctifs tenant compte de la nature chimique des hydrocarbures

### إنشاء قوانين جديدة لحساب الخلائط الهيدروكربونية

#### ملخص

يتمثل عملنا في إعداد قوانين جديدة لحساب الخلائط الهيدروكربونية، ولتحقيق ذلك قمنا بقياس الكثافة، مؤشر الإنكسار، اللزوجة، التوتر السطحي ونقطة الأنيلين لحوالي ستين خليطاً ثنائياً و ثلاثياً، ثم حاولنا بعد ذلك إيجاد هذه الخصائص الفيزيائية بتطبيق علاقات أساسية، كالمعدل الحسابي، الهندسي، التكعيبي، اللوغارتمي والمتجانس و علاقات تجريبية.

تعتمد قوانين الخلائط الجديدة الموضوعية على تحسين القوانين القديمة بإدراج عوامل تأخذ بالحسبان العائلة الفيزيائية للعناصر المكونة للخليط.

## Setting up the new rules of mixtures for the calculation of the physical properties of hydrocarbon mixtures.

### SUMMARY

Our work consists in working out the new rules of mixtures for the prediction of the physical properties of hydrocarbon mixtures. For it we measured the density, the indication of refraction, the viscosity, the superficial tension and the point of aniline experimentally for about sixty binary and ternary mixtures, then we tried to recover the same properties while applying rules of mixtures classics as the arithmetic, geometric, cubic, logarithmic and harmonic mean and also of interrelationships of the literature.

The new rules of mixtures established are based on the improvement of the rules classic while introducing the corrective terms holding amount of the chemical nature of hydrocarbons

# Sommaire

## I . PARTIE THEORIQUE

INTRODUCTION.....	1
1 . LE PETROLE BRUT.....	2
1 . 1    Composition des pétroles bruts et des fractions pétrolières.....	2
1 . 1 . 1    Hydrocarbures paraffiniques	
1 . 1 . 2    Hydrocarbures naphthéniques	
1 . 1 . 3    Hydrocarbures aromatiques	
1 . 1 . 4    Hydrocarbures oléfiniques	
1 . 1 . 5    Composés hétéro atomiques	
• Les composés oxygénés	
• Les composés sulfurés	
• Les composés azotés	
1 . 2    Classification des pétroles bruts.....	4
1 . 2 . 1    Classifications scientifiques	
1 . 2 . 2    Classification technologique	
1 . 2 . 3    Classification de SACCHANEN	
2 . ANALYSE DES PETROLES BRUTS .....	6
2 . 1    Analyses préliminaires .....	6
2 . 2    La distillation fractionnée .....	6
2 . 2 . 1    Courbe de distillation TBP	
2 . 2 . 2    Courbe de distillation ASTM	
2 . 3    Les propriétés physiques correspondant à des essais normalisés.....	8
* La densité	
* La viscosité	
* Le point d'aniline	
* Le point éclair	
* Le point de congélation	
* Le point de trouble	
* Le point d'écoulement	
* L'indice d'octane	

- \* Le plomb tétra éthyle
- \* La teneur en cendre
- \* La teneur en soufre
- \* La teneur en sels et chlorures

3 .	PROPRIETES PHYSIQUES DES HYDROCARBURES.....	12
3 . 1	La température d'ébullition .....	12
3 . 2	La densité .....	13
3 . 3	L'indice de réfraction .....	13
3 . 3 . 1	L'indice de corrélation I	
3 . 3 . 2	La réfraction molaire RM	
3 . 4	La viscosité .....	15
3 . 5	La tension superficielle.....	15
3 . 6	Le point d'aniline.....	16
3 . 7	La masse moléculaire.....	16
4 .	<b>CALCUL DES PROPRIETES PHYSIQUES</b>	
4 . 1	La densité .....	17
4 . 1 . 1	La densité des corps purs	
	a- Corrélation de Skander-Chitour	
	b- Corrélation de Dermoune-Chitour	
	c- Corrélation de Bouamra-Chitour	
4 . 1 . 2	La densité des mélanges de corps purs	
	• Règle d'additivité	
4 . 1 . 3	La densité des fractions pétrolières	
	• Règle d'additivité	
4 . 2	L'indice de réfraction.....	19
4 . 2 . 1	L'indice de réfraction des corps purs	
	a- Equation de Smittenberg	
	b- Corrélation de Lorentz-Lorenz	
4 . 2 . 2	L'indice de réfraction des mélanges de corps purs	
	a- Règle d'additivité	
	b- corrélation de Riazi-Daubert	
4 . 2 . 3	L'indice de réfraction des fractions pétrolières	
	• Règle d'additivité	

4.3	La viscosité .....	20
4.3.1	La viscosité des corps purs	
a-	Equation de Souders	
b-	Equation d'Orrick-Erbar	
c-	Corrélation de Zidelkhier-Chitour	
d-	Corrélation de Skander-Chitour	
4.3.2	La viscosité des mélanges de corps purs	
a-	Corrélation de Kendall-Monroe	
b-	L'équation d'Arrhenius	
4.3.3	La viscosité des fractions pétrolières	
a-	Correlation de Beg-Amin-Hussein	
b-	Corrélation de l'API	
c-	Equation de Mehotra	
4.4	La tension superficielle .....	24
4.4.1	La tension superficielle des corps purs	
a-	Corrélation de Macleod-Sudgen	
b-	Corrélation de Goldhammer	
c-	Corrélation de la loi des états correspondants	
d-	Corrélation de Meissner et Michaels	
e-	Corrélation de Skander-Chitour	
4.4.2	La tension superficielle des mélanges de corps purs	
•	Variation de la tension superficielle à basse pression	
a-	Corrélation de Macleod-Sudgen	
b-	Corrélation de Macleod-Sudgen modifiée	
•	Variation de la tension superficielle pour des pressions élevées	
a-	Corrélation de Weinaug et Katz	
4.4.3	La tension superficielle des fractions pétrolières	
a-	Corrélation de Pedersen, Lund, Fredenslund	
b-	Equation de Sanborn et Evans	
c-	Utilisation des méthodes d'additivité	
4.5	Le point d'aniline .....	30
4.5.1	Le point d'aniline des corps purs	
a-	Corrélation de Dermoune-Chitour	
b-	Corrélation de Skander-Chitour	

4.5.2	Le point d'aniline des mélanges de corps purs Règle d'additivité	
4.5.3	Le point d'aniline des fractions pétrolières a- Corrélation de R.P.Walsh et J.V.Mortimer b- Corrélation de Robert	
4.6	Les propriétés critiques et pseudo critiques .....	32
4.6.1	Les propriétés critiques des corps purs Méthode de Lydersen	
4.6.2	Les propriétés critiques des mélanges de corps purs Règle de KAY	
4.6.3	Les propriétés critiques des fractions pétrolières a- Corrélation de Riazi-Daubert b- Règle d'additivité	
<b>II. PARTIE EXPERIMENTALE ET CALCUL</b>		
1.	INTRODUCTION.....	35
2.	MESURE DES PROPRIETES PHYSIQUES.....	35
2.1	Préparation des mélanges .....	35
2.1.1	les étapes de préparation	
2.2	Mesure des propriétés physiques .....	35
2.2.1	La densité $d_4^{20}$	
2.2.2	L'indice de réfraction $n_D^{20}$	
2.2.3	La viscosité cinématique $v^{20}$	
2.2.4	La tension superficielle $TS^{20}$	
2.2.5	Le point d'aniline PA	
2.3	Résultats des mesures expérimentales.....	38
	• Corps purs	
	• Mélanges binaires	
	• Mélanges ternaires	

### 3 . CALCUL DES PROPRIETES DES MELANGES PAR DIFFERENTES METHODES

3.1	Par les règles de mélanges classiques .....	40
	• La densité	
	• L'indice de réfraction	
	• La viscosité	
	• La tension superficielle	
	• Le point d'aniline	
3.2	Par les corrélations de la littérature .....	61
	• La densité	
	Corrélation de Skander-Chitour	
	• L'indice de réfraction	
	Corrélation de Riazi-Daubert	
	• La viscosité	
	Correlation de Beg-Amin-Hussein	
	Equation de Mehotra	
	• La tension superficielle	
	Corrélation de Macleod-Sudgen modifiée	
	• Le point d'aniline	
	Corrélation de Robert	
	Corrélation de Walsh	
4.	ETABLISSEMENT DE NOUVELLES REGLES DE MELANGES	
4.1	Méthode adoptée .....	66
4.2	Résultats et commentaires .....	67
	CONCLUSION.....	69
	BIBLIOGRAPHIE.....	70

## INDEX

### PARTIE THEORIQUE

- Tableau 1 Norme pour la classification des pétroles de l'U.S.Bureau of Mines.
- Tableau 2 Classification chimique des pétroles proposée par l'U.S.Bureau of Mines.
- Tableau 3 Classification technologique des pétroles.
- Tableau 4 Classification des pétroles (suite).
- Tableau 5 Classification des pétroles selon SACCHANEN.
- Tableau 6 Intervalle de variation de facteur de corrélation I.
- Tableau 7 Les valeurs des constantes a, b, c et d de la corrélation de Skander-Chitour pour la densité.
- Tableau 8 Valeurs des paramètres A et B de l'équation de Orrick-Erbar.
- Tableau 9 Valeurs des constantes a, b, c et d de la corrélation de Skander-Chitour pour l'indice de réfraction et pour  $7 < \text{nombre d'atomes de carbones} < 16$ .
- Tableau 10 Valeurs des constantes a, b, c et d de la corrélation de Skander-Chitour pour l'indice de réfraction et pour  $16 < \text{nombre d'atomes de carbones} < 30$ .
- Tableau 11 Valeurs de contribution des groupements d'une molécule.
- Tableau 12 Valeurs des constantes a, b, c et d de la Corrélation de Skander-Chitour pour la tension superficielle des corps purs.
- Tableau 13 Les coordonnées de X et Y de la corrélation de Weinaug et Katz.
- Tableau 14 Valeurs des constantes a, b, c et d de la Corrélation de Skander-Chitour pour le point D'aniline des corps purs.

## INDEX



### PARTIE EXPERIMENTALE ET CALCULE

- Tableau 1 Compositions des mélanges binaires.
- Tableau 2 Compositions des mélanges ternaires.
- Tableau 3 Résultats de mesure des propriétés des corps purs.
- Tableau 4 Résultats de mesure des propriétés des mélanges binaires.
- Tableau 5 Résultats de mesure des propriétés des mélanges ternaires.
- Tableau 6 Comparaison entre les densités calculées et celles mesurées.
- Tableau 7 Comparaison entre les indices de réfraction calculés et ceux mesurés.
- Tableau 8 Comparaison entre les viscosités calculées et celles mesurées.
- Tableau 9 Comparaison entre les tensions superficielles calculées et celles mesurées.
- Tableau 10 Comparaison entre les points d'anilines calculés et ceux mesurés.
- Tableau 11 Ecart moyen enregistré par la corrélation de Skander-Chitour pour la densité.
- Tableau 12 Ecart moyen enregistré par la corrélation de Riazi-Daubert pour l'indice de réfraction.
- Tableau 13 Ecart moyen enregistré par les corrélations de Beg-Amin-Hussein et Mehotra pour la viscosité.
- Tableau 14 Ecart moyen enregistré entre les tensions superficielles mesurées et celles calculées Par la méthode de Macleod-Sudgen.
- Tableau 15 Ecart moyen enregistré entre les points d'anilines mesurés et ceux calculés Par les méthodes de Robert et Mortimer.
- Tableau 16 Coefficients des nouvelles règles pour la viscosité.
- Tableau 17 Coefficients des nouvelles règles pour la tension superficielle.
- Tableau 18 Ecart moyen enregistré dans le cas de la viscosité par les règles classiques et les règles corrigées.
- Tableau 19 Ecart moyen enregistré dans le cas de la tension superficielle par les règles classiques et les règles corrigées.

## NOTATIONS ET ABBREVIATIONS

N°mel	: Numéro du mélange.
C1	: Constituant 1.
C2	: Constituant 2.
C3	: Constituant 3.
m1	: Composition massique du constituant 1.
m2	: Composition massique du constituant 2.
m3	: Composition massique du constituant 3.
n1	: Composition molaire du constituant 1.
n2	: Composition molaire du constituant 2.
n3	: Composition molaire du constituant 3.
V1	: Volume massique du constituant 1.
V2	: Volume molaire du constituant 2.
V3	: Volume molaire du constituant 3.
nC6	: Hexane.
nC7	: Heptane.
nC9	: Nonane.
nC10	: Décane.
nC11	: undécane.
nC12	: Dodécane.
nC13	: Tridécane.
nC14	: Tetradécane.
nC15	: pentadécane.
CyC6	: Cyclohexane.
mCyC6	: Methylcyclohexane.
Bz	: Benzène.
Tol	: Toluene.
Et Bz	: Ethylbenzène.
d <sup>20</sup>	: Densité à 20°C.
n <sup>20</sup>	: Indice de réfraction à 20°C.
v <sup>20</sup>	: viscosité à 20°C.
TS <sup>20</sup>	: Tension superficielle à 20°C.
PA	: Point d'aniline.
exp	: Expérimentale.
ar	: Arithmétique.
géo	: Géométrique.
cub	: Cubique.
log	: logarithmique.
har	: Harmonique.
mas	: En pourcentages massique.
mol	: En pourcentage molaire.
vol	: En pourcentage volumique.
e	: Ecart moyen
bin	: Binaire.
ter	: Ternaire.
Som	: somme : binaire + ternaire.

## INTRODUCTION



Dans l'industrie chimique et particulièrement dans l'industrie pétrolière, l'ingénieur doit pouvoir disposer à tout moment, dans des délais relativement courts, des données relatives aux principales propriétés et caractéristiques des mélanges dont il doit effectuer le traitement. Ces caractéristiques sont nécessaires pour le dimensionnement des équipements et la simulation des procédés de séparation et de traitement.

L'accès aux propriétés de ces produits est basé sur des mesures expérimentales ou sur des méthodes de calcul. Pour des mélanges dont la composition est parfaitement connue, des règles de mélanges classiques sont souvent utilisées en effectuant des pondérations à partir des propriétés des corps purs qui les composent. Ce pendant, la moindre imprécision sur les valeurs de ces dernières se répercute inévitablement sur la propriété du mélange. Ces règles de mélanges ne constituent cependant qu'une première approximation, car elles négligent les grandeurs d'excès dues aux interactions entre les différents constituants.

Dans un tel contexte, nous avons, à partir d'une banque de données expérimentale de quelques propriétés physiques de mélanges d'hydrocarbures binaires et ternaires, à nombre fini de constituants et de compositions connues, testé différentes règles de mélanges et tenté d'élaborer de nouvelles équations de pondération dans lesquelles nous prenons en compte les interactions entre composés appartenant à des familles différentes.

Les valeurs des propriétés obtenues par calcul sont comparées à celles obtenues par l'expérience et par des corrélations recommandées dans la littérature.

## 1 . LE PETROLE BRUT

Le pétrole brut est un liquide brun rougeâtre, quelquefois à reflets verdâtres, et généralement plus léger que l'eau. Il est plus ou moins fluide suivant son origine et son odeur est habituellement forte et caractéristique surtout s'il a une forte teneur en soufre.

### 1 . 1 Composition des produits pétroliers bruts et des fractions pétrolières :

Le pétrole brut et les fractions pétrolières qui en sont issues sont essentiellement composés de molécules résultant de la combinaison d'atomes de carbone tétravalents et d'atomes d'hydrogène monovalents, appelés hydrocarbures. En outre, le pétrole brut contient également du soufre, essentiellement sous forme de composés tels que l'hydrogène sulfuré, les mercaptans **R-SH**, disulfures, et polysulfures(**R-S-R-S**)<sub>n</sub> de l'oxygène et de l'azote.

Les fractions lourdes du pétrole brut renferment à l'état de traces des composés organométalliques à base de Fer, Nickel, et de Vanadium. Malgré une décantation prolongée, le pétrole brut contient toujours un peu de sédiments et d'eau salée provenant du gisement[1]. Nous trouvons surtout les trois classes d'hydrocarbures(Paraffines, Naphtènes, Aromatiques).

#### 1 . 1 . 1 Hydrocarbures paraffiniques :

Les hydrocarbures paraffiniques sont des hydrocarbures saturés de formule générale  $C_nH_{2n+2}$ .

Exemple: n-hexane, 2Méthyl-butane,..etc.

Les hydrocarbures paraffiniques normaux, c'est-à-dire à chaîne droite, ne réagissent pas avec l'acide sulfurique, l'acide nitrique et la soude caustique. Par contre, les hydrocarbures paraffiniques ramifiés, contenant au moins un carbone tertiaire comme l'iso pentane, sont un peu plus réactifs. Les hydrocarbures paraffiniques donnent lieu à des réactions de substitution. Le nombre d'isomères varie de façon exponentielle.

#### 1 . 1 . 2 Hydrocarbures naphténiques:

Les hydrocarbures naphténiques sont des hydrocarbures saturés comportant un ou plusieurs cycles de formule générale  $C_nH_{2n-2RN}$ .

RN étant le nombre de cycles naphténiques.

Exemples: cyclopentane, Méthyl-2bicyclo[3 . 2 . 0]heptane,..etc.

Le nombre de cycles dans la molécule permet de classer ces hydrocarbures en trois classes: monocycliques, dicycliques, tri cycliques. Les carbones sont ici associés en anneau et les valences sont assez peu réactifs, ils sont plus réactifs que les paraffines, ils donnent lieu à des réactions de substitution et d'addition sur le cycle dans certaines conditions.

#### 1 . 1 . 3 Hydrocarbures aromatiques:

Les hydrocarbures aromatiques, homologues supérieurs du benzène, ont pour formule  $C_nH_{2n+2-2Rn-6Ra-2Ras}$ .

$R_n$  étant le nombre de cycles naphthéniques,  $R_a$  le nombre de cycles aromatiques et  $R_s$  le nombre de cycles substantiels. La notion de cycles substantiels a été introduite pour tenir compte de la façon dont les noyaux aromatiques sont disposés dans la molécule; lorsque les cycles sont condensés comme dans le naphthalène, le deuxième cycle n'apporte que quatre atomes de carbone, dans ce cas,  $R_a=2R_s-1$ , alors que, dans le cas du diphenyle, les deux cycles aromatiques sont séparés et apportent chacun six atomes de carbone, dans ce cas  $R_a=2R_s-2$ .

Nous classons généralement les hydrocarbures aromatiques en deux types: les hydrocarbures purs, qui ne comportent que des cycles aromatiques et des chaînes latérales paraffiniques et les hydrocarbures naphthéno-aromatiques[2], qui comportent en plus des cycles naphthéniques.  
Exemples: Benzène, Toluène, Naphtalène,..etc.

#### 1.1.4 Hydrocarbures oléfiniques:

Ces hydrocarbures qui ne sont pas présents dans le brut, mais qu'on peut rencontrer dans les produits issus des opérations de transformations moléculaires (exp. : cracking), ont pour formule  $C_nH_{2n}$ .  
Exemple : Ethylène, butylène.

Ils comportent une double liaison qui les rend aptes à s'associer facilement aux halogènes pour donner des produits d'addition. Ils se combinent à l'acide sulfurique concentré[3]. En général, ils se forment dans les procédés de traitement du pétrole. Ces substances sont de très importants produits intermédiaires de première génération. Ils sont le point de départ de la synthèse pétrochimique et organique de base[4].

#### 1.1.5 Composés hétéro atomiques :

Certains pétroles bruts, en particulier ceux du Proche-Orient, contiennent des composés hétéro atomiques (soufre, oxygène et azote). La teneur en ces éléments est fonction de l'âge et de l'origine du pétrole.

- **Les composés oxygénés :**

Les composés oxygénés constituent rarement plus de 10% de la masse totale des pétroles bruts. Ce sont des acides, phénols, cétones et esters, plus rarement anhydrides et dérivés furaniques[4].

- **Les composés sulfurés :**

Le pétrole de la plupart des réserves mondiales actuelles est sulfureux ou très sulfureux. On peut rencontrer des mercaptans, des sulfures, des disulfures et sulfures de thiénylène, thiophènes, structures cycliques diverses.

- **Les composés azotés :**

Les composés azotés sont contenus dans les pétroles en quantités bien faibles, si nous les comparons aux composés oxygénés ou sulfurés.

Nous considérons deux groupes de produits azotés basiques et les produits non basiques. Les composés basiques isolés sont la pyridine, la quinoléine et l'isoquinoline et certains de leurs homologues supérieurs. Les produits non basiques sont encore assez mal connus ; cependant, on a pu établir la présence de produits du type pyrrole, indole ou carbazole[5].

## 1.2 Classifications des pétroles bruts :

L'énorme variation de la composition chimique, aussi bien dans la nature que dans la diversité des composants, rend très difficile une classification unique.

### 1.2.1 Classifications scientifiques :

Il existe un grand nombre de classifications chimiques, génétiques, industrielles et commerciales. A l'époque où l'industrie pétrolière n'était qu'à ses débuts, les pétroles étaient divisés en légers ( $d_{15}^{15} < 0.828$ ) ; moyens ( $0.828 < d_{15}^{15} < 0.884$ ) et lourds ( $d_{15}^{15} > 0.884$ ) [4].

Une caractérisation plus précise des pétroles est fournie par la « classification chimique » de l'U.S. Bureau of Mines. Elle part de la corrélation entre la nature des hydrocarbures qui composent les pétroles. Dans ce cas nous examinons la fraction distillant sous pression atmosphérique entre 250 et 275°C (fraction caractéristique de la partie légère du pétrole), et la fraction distillant sous pression résiduelle de 5.3 KPa entre 275 et 300°C (fraction caractéristique de la partie lourde du pétrole). Une fois déterminée la densité des deux fractions, nous rangeons les parties légères et lourdes dans une des trois classes définies pour les pétroles des différents types (Tableau 1.), puis en partant des données sur les fractions caractéristiques, nous choisissons pour le pétrole une des sept classes (Tableau 2.).

Fractions	Densité des fractions pétrolières		
	Base paraffinique	Base mixte	Base naphénique
250 à 275°C (pression atmosphérique)	<0.8251	0.8251-0.8597	>0.8597
275 à 300°C (5.3Kpa)	<0.8762	0.8762-0.9334	>0.9334

Tableau 1. Norme pour la classification des pétroles de l'U.S. Bureau of Mines.

no classe	Base (classe) du pétrole	Base de la partie légère	Base de la partie lourde
1	paraffinique	paraffinique	paraffinique
2	paraffinique-mixte	paraffinique	mixte
3	mixte-paraffinique	mixte	paraffinique
4	mixte	mixte	mixte
5	mixte-naphénique	mixte	naphénique
6	naphénique-mixte	naphénique	mixte
7	naphénique	naphénique	naphénique

Tableau 2. Classification chimique des pétroles proposée par l'U.S. Bureau of Mines.

L'inconvénient de cette classification consiste à donner des limites plutôt conventionnelles des fractions caractéristiques, en outre, les désignations des classes reflètent mal la composition réelle des pétroles.

Une classification originale qui tient compte de la composition chimique des pétroles est proposée par l'institut de recherches pétrolières de Grozny (RUSSIE) ; (Groz N II) [4].

Nous distinguons dans ce cas les pétroles paraffiniques, paraffino-naphéniques-naphéniques, paraffino-naphéno-aromatiques et aromatiques.

Toutes les fractions des bruts paraffiniques sont caractérisées par une forte teneur en alcane : plus de 50% dans les fractions essence, plus de 20% dans les fractions huiles.

Dans les pétroles paraffino-naphténiques nous trouvons, à côté des alcanes, des quantités considérables de cycloalcanes, alors que les arènes sont rares, les pétroles de ce type contiennent peu de résines et d'asphaltènes.

Dans les pétroles naphténiques un pourcentage élevé de cycloalcanes(parfois plus de 60%) est caractéristique de toutes les fractions, les alcanes y sont peu nombreux, la quantité de résines et d'asphaltènes est également réduite.

Les pétroles paraffino-naphténo-aromatiques renferment les hydrocarbures de ces trois catégories en proportions à peu près égales, et jusqu'à 10% de résines asphaltènes.

Les pétroles naphténo-aromatiques se caractérisent par une forte teneur en cycloalcanes et arènes, surtout dans les fractions lourdes. Les alcanes ne sont présents, en faibles quantités, que dans les coupes légères. La teneur en paraffines solides ne dépasse pas 0.3%, celle en résines et asphaltènes atteignant 15 à 20% . En fin, les pétroles aromatiques sont très denses.

### 1.2.2 Classification technologique :

Les pétroles sont subdivisés en classes( I, II, III ) : selon la teneur en soufre du brut, de l'essence, du carburéacteur et de l'huile diesel ; en types( T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> ) : selon le rendement en fractions distillant au-dessous de 350°C(**Tableau 3**) ; en groupes( M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub> ) : selon l'indice de viscosité des huiles de base ; en sous-groupes( N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub> ) : selon l'indice de viscosité des huiles de base ; en espèces( P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> ) : d'après la teneur en paraffine(H.C.Solides contenus dans le pétrole)(**Tableau 4**)

Classe	Teneur en soufre, en %(massiques)				Type	Taux des coupes distillant au-dessous de 350°C en % (massiques)
	brut	Essence jusqu'à 200°C	Carburéacteur 120-240°C	Huile diesel 240-350°C		
<b>I</b>	< 0.50	< 0.15	< 0.1	< 0.2	T <sub>1</sub>	> 45
<b>II</b>	0.51-2.0	< 0.15	< 0.25	< 1.0	T <sub>2</sub>	30-44.9
<b>III</b>	> 2.0	> 0.15	> 0.25	> 1.0	T <sub>3</sub>	< 30

**Tableau 3.** Classification technologique des pétroles.

Groupe	Teneur Potentielle en Huiles, en %(massiques)		Sous-groupe	Indice de viscosité des Huiles de base	Espèce	Teneur en alcanes du pétrole, en %(massiques)
	Pétrole	Mazout > 350°C				
<b>M<sub>1</sub></b>	> 25	> 45	N <sub>1</sub>	> 85	P <sub>1</sub>	< 1.50
<b>M<sub>2</sub></b>	15-25	> 45				
<b>M<sub>3</sub></b>	15-25	30-45	N <sub>2</sub>	40-85	P <sub>2</sub>	1.51-6.0
<b>M<sub>4</sub></b>	< 15	< 30			P <sub>3</sub>	> 60

**Tableau 4.** Classification technologique des pétroles(suite)

### 1.2.3 Classification de SACCHANEN :

SACCHANEN [3], [6] donne les compositions suivantes pour des pétroles bruts typiques des trois séries principales (Tableau 5).

Nature des hydrocarbures	Brut paraffinique	Brut naphténiq	Brut asphaltique
Paraffines	40	12	5
Naphtènes	48	75	15
Aromatiques	10	10	20
Asphaltènes (polycycliques)	2	3	60

Tableau 5. Classification des pétroles selon SACCHANEN.

Cette répartition n'est en fait pas très claire, et l'imprécision augmente au fur et à mesure que le poids moléculaire augmente. Il est par exemple très difficile de décider si un naphténiq très substitué avec une chaîne paraffinique se comportait comme une paraffine ou un naphténiq, c'est le cas très souvent d'hydrocarbures à point d'ébullition élevés.

## 2. ANALYSE DES PETROLES BRUTS

Le pétrole brut se trouve toujours en présence de gaz et d'une certaine quantité d'eau salée, il faut procéder à une séparation. Les techniques classiques utilisées sur le chantier font intervenir la séparation spontanée par gravité, l'injection de tensioactifs et le chauffage. Le gaz, s'il est produit en quantités suffisantes, peut être débarrassé des hydrocarbures légers liquides, il peut être utilisé soit pour la ré injection, soit pour brûleurs aux torches[6].

### 2.1 Analyses préliminaires :

Les coupes pétrolières sont des mélanges complexes d'un très grand nombre d'hydrocarbures, nous ne pouvons donc pas leur appliquer les méthodes d'identification utilisées pour les substances chimiques définies. Comme nous le savons, une coupe pétrolière n'aura pas un point d'ébullition comme un corps pur, mais un intervalle de distillation, borné par une température initiale et finale.

Il est donc nécessaire de comparer les produits pétroliers dans des conditions strictement définies. Les normes qui peuvent paraître trop détaillées sont le fruit d'un long travail.

Les essais préliminaires que nous réalisons sur le pétrole sont la détermination de la densité et la courbe de distillation ASTM, qui permet la détermination de la température moyenne pondérée d'ébullition[1].

### 2.2 La distillation fractionnée :

Les pétroles des différents gisements présentent des différences considérables du point de vue composition.

Tous les dérivés liquides ou solides du pétrole sont des mélanges très complexes contenant souvent plusieurs dizaines d'hydrocarbures de propriétés suffisamment voisines.

La distillation fractionnée est un procédé de séparation qui utilise la différence des points d'ébullition entre des produits qui se trouvent mélangés, et même dissous les uns dans les autres dans la matière première.

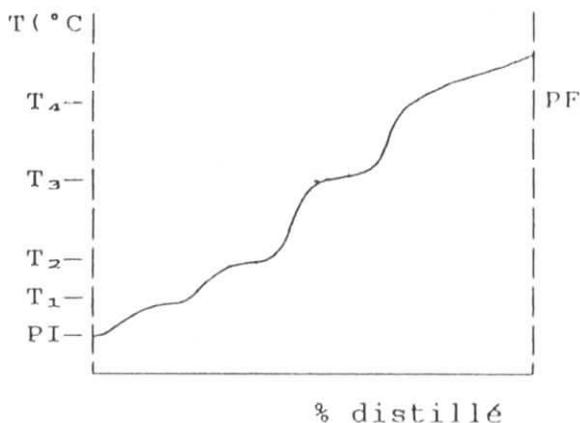
A tout moment, les vapeurs qui s'échappent sont des mélanges de produits, les premières fractions ont une concentration plus importante en produits volatils que le mélange de départ, les dernières fractions auront une concentration en produits lourds plus grande que la matière première[1].

### 2.2.1 Courbe de distillation TBP :

Si la distillation est faite dans un appareillage représentant un nombre important d'étages, c'est à dire un appareillage à très bonne sélectivité équivalent à la succession d'un très grand nombre de distillations simples élémentaires, on obtient en notant la température de la vapeur en fonction du pourcentage distillé, une courbe dite "TBP". Cela signifie que les corps purs passent successivement en phase vapeur en tête de colonne à distiller, à leur température d'ébullition, à la pression de marche de la colonne.

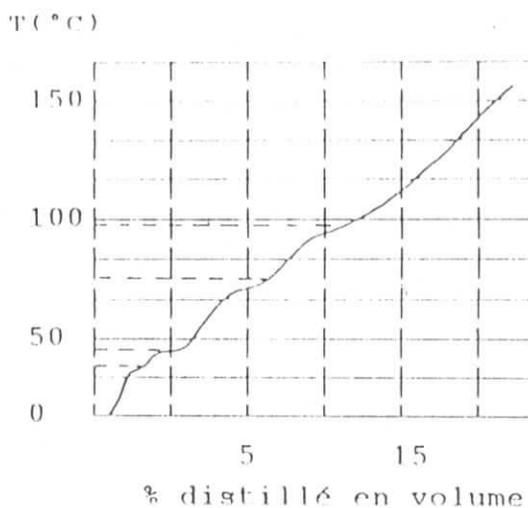
Pour un mélange constitué d'un nombre limité de constituants, la courbe est formée d'une succession de paliers horizontaux, la longueur de chaque palier étant proportionnelle à la concentration du corps pur bouillant à cette température dans le mélange (**figure 1**).

Si le mélange est très complexe (pétrole brut), la succession de paliers n'est plus visible car les composants sont très nombreux avec des points d'ébullition voisins, et la courbe est en fait une courbe continue (**figure 2**).



Courbe TBP d'un mélange de (04) constituants

Figure N°1



Courbe de distillation TBP d'un pétrole brut.

Figure N°2

### 2.2.2 Courbe de distillation ASTM :

La distillation dite ASTM (American Standard for testing material) nous permet de prévoir le comportement de la coupe pétrolière ou du brut. En effet la courbe ASTM fournit à l'utilisateur de précieux renseignements sur la composition du pétrole brut.

L'appareillage présente un ballon de distillation pouvant contenir 100 ou 200 centimètres cubes de produit que l'on chauffe et distille à une vitesse déterminée. Les vapeurs formées sont condensées dans un tube en cuivre baignant dans un mélange d'eau et de glace pilée puis recueillies dans une éprouvette graduée.

L'opérateur note la température d'apparition de la première goutte de condensat à la sortie du tube. C'est le point initial de la distillation. Ensuite la température est relevée régulièrement lorsque 5, 10, 20, ... 90 et 95 % du produit sont distillés. Le maximum de température est le point final de distillation [1].

### 2.3 Les propriétés physiques correspondant à des essais normalisés :

Dans une première étape, le pétrole brut est fractionné en coupes de volatilités différentes par distillation fractionnée. Chacune de ces fractions sera ensuite destinée à un mode d'utilisation bien déterminé. La fraction la plus légère est l'essence, qui correspond à la coupe qui contient globalement des hydrocarbures ayant entre 5 et 12 atomes de carbone. La fraction qui suit est une coupe lourde, elle comporte entre 12 et 15 atomes de carbone, cette coupe est connue sous le nom de pétrole lampant. Plus lourde, la coupe qui comporte entre 15 et 21 atomes de carbones constitue le gas-oil qui sert de carburant pour moteurs diesels (engins à faibles vitesses) [1].

Nous devons nous assurer que le dérivé en question a des caractéristiques qui conviennent bien à tous les emplois qu'il pourrait recevoir. On le soumet donc à une série d'essais normalisés qui permettent de voir si le dérivé concerné satisfait aux spécifications fixées pour lui.

Les méthodes d'essais normalisés sont les méthodes adoptées à l'échelle internationale. Il existe différentes normes selon les pays, les plus utilisées sont :

En France : AFNOR  
Aux USA : ASTM  
En Angleterre : IB  
En Allemagne : DIN.

Actuellement, la majorité des méthodes sont devenues internationales et ne diffèrent souvent que par le choix de l'appareil d'analyse.

Les différentes coupes doivent être analysées selon les normes citées ci-dessous pour pouvoir répondre aux spécifications requises en vue de leur commercialisation.

#### \* La densité :

La densité d'un corps pur ou d'un mélange de corps purs ou d'une fraction pétrolière est l'une des grandeurs facilement accessibles expérimentalement. La mesure de la densité fait l'objet de normes pour les produits courants et pour les produits bitumineux. C'est le cas des normes AFNOR et des normes ASTM.

**\* La viscosité :**

La viscosité joue un rôle important dans de nombreux procédés industriels qui mettent en jeu des écoulements de fluides ou de transfert de quantité de mouvement [1]. Sa mesure fait l'objet des normes françaises NFT60-100, et américaine ASTM D445-65.

**\* Le point d'aniline :**

Le point d'aniline est la température la plus basse à laquelle des volumes égaux d'aniline et de produit à analyser sont complètement miscibles. Sa détermination fait l'objet de la norme américaine ASTM D611-64 et la norme française AFNOR : NF M 07.021.

**\* Le point éclair :**

Dans les conditions normales de température et de pression, certains produits pétroliers peuvent dégager à leur surface de petites quantités d'hydrocarbures légers susceptibles de s'enflammer en présence de flamme.

La température minimale à laquelle il faut porter l'échantillon liquide pour produire ce phénomène est appelée : point éclair [10].

La méthode expérimentale qui permet sa détermination consiste à chauffer dans un creuset ouvert ou fermé, à vitesse déterminée, un échantillon du produit jusqu'à ce qu'une petite quantité des vapeurs qu'il émet vienne exploser au contact d'une flamme de veilleuse [3]. Cet essai est régi par plusieurs normes spécifiques à chaque nature de produit, en effet :

. pour les solvants et les kérosènes, on utilise les normes : NF M07-011, ASTM D56 et IP 170.

. Pour les gas-oils, huiles et fuels, on utilise les normes : NF T60-103, NF T60-118, NF M07-019, ASTM D92, ASTM D93 et IP 34.

. Pour les bitumes fluxés, on utilise les normes : NF T66-009 et ASTM D93 [1]

**\* Le point de congélation [1] et [3] :**

Le point de congélation est la température à laquelle la fraction soumise au refroidissement dans une éprouvette demeure immobile, lorsque l'éprouvette est inclinée de 45°.

Généralement les points de congélation des paraffines sont plus faibles que ceux des naphthènes qui ont des valeurs intermédiaires, et ceux des aromatiques sont les plus élevés.

Les normes utilisées pour la mesure de ce point sont :

. Carburateurs NF 1088 et ASTM D1477

. Les gas-oils et les fuels NF T60-116

. Les huiles lubrifiantes NF T60-105

Le point de congélation est un paramètre important pour les kérosènes TR0 et TR4 dont les points doivent être bas (utilisation à haute altitude dans l'aviation civil et militaire).

**\* Le point de trouble :**

Le point de trouble d'un produit pétrolier est la température à laquelle les paraffines, cires ou autres matières commencent à se solidifier ou à se séparer de la solution lorsque ce produit est refroidi dans des conditions normalisées.

Ainsi, le refroidissement se faisant lentement et sans agitation, on note la température à laquelle apparaît un louchissement ou voile laiteux dû à la formation de microcristaux : c'est le point de trouble.

**\* Le point d'écoulement :**

Le point d'écoulement est la plus basse température à laquelle coule encore le produit analysé lorsqu'il est refroidi, sans agitation, dans des conditions normalisées.

Il permet d'apprécier les limites de température à respecter dans la mise en œuvre des produits, en particulier pour le pompage en hiver.

La mesure de cette caractéristique se fait selon les normes AFNOR NF T60-105 et ASTM D97-47.

**\* L'indice d'octane :**

C'est une caractéristique essentielle des essences. Elle détermine les qualités de combustion du carburant.

Un carburant a un indice d'octane égal à  $x$ , si dans le moteur CFR, il provoque un cliquetis équivalent à celui observé pour un mélange de  $x$  parties en volume d'iso octane et  $(100-x)$  d'heptane.

L'indice d'octane des fractions pétrolières légères ne peut se déduire, même par corrélation empirique, des autres caractéristiques physiques, il faut le mesurer.

D'une manière générale, toutes les caractéristiques antidétonantes des carburants ne donnent lieu à aucune loi simple, par suite de la complexité des paramètres qui les influencent.

La pondération des indices d'octane en volume conduit à une valeur qui est très souvent inférieure à celle observée réellement pour le mélange. En première approximation, cette loi d'additivité en fonction des pourcentages volumétriques est acceptable [1].

**\* Le plomb tétra éthyle :**

Le plomb est un additif qui est ajouté en faibles doses à l'essence dans le but d'augmenter son indice d'octane. C'est un liquide qui a une densité égale à 1.66, il est insoluble dans l'eau et a une température d'ébullition de 200°C. Le plomb tétra éthyle est un liquide toxique, c'est pour cela que la teneur en plomb est limitée et imposée par les spécifications officielles.

Nous utilisons pour sa détermination la norme M. 07. 014.

#### **\* La teneur en cendre :**

Les cendres sont des sels et oxydes minéraux qui demeurent à l'état solide après combustion complète. Elles sont constituées principalement de silice, fer, calcium, sodium et vanadium, ce dernier représentant dans certains cas 50% des cendres totales.

L'essai de la détermination de la teneur en cendres s'effectue sur les produits lourds que l'on calcine dans un creuset en évitant l'inflammation des vapeurs. Le résidu charbonneux est ensuite incinéré avec une flamme très chaude pour brûler le carbone. Après refroidissement et dessiccation, il ne reste plus que des cendres [1].

Les normes utilisées pour cet essai sont : NF T60-111 et ASTM D482.

#### **\* La teneur en soufre :**

Il s'agit de déterminer la teneur en dérivés soufrés : mercaptans, hydrogène sulfuré, sulfures, thiophènes, etc.

Sa détermination est prévue par les normes suivantes :

- . NF M07-005, ASTM D1266 : méthode à la lampe
- . NF T60-109, ASTM D129 : méthode à la bombe
- . NF T60-108, ASTM D1551 : méthode du tube de quartz
- . NF M07-015, ASTM D130 : corrosion à la lame de cuivre

Les trois premiers essais permettent de doser le soufre total dans le produit et consiste à brûler ce dernier dans une lampe, bombe ou nacelle placée dans un tube de quartz, afin d'analyser les gaz de combustion par des solutions absorbantes sélectives.

L'essai à la lame de cuivre consiste quant à lui, à plonger une lame de cuivre rouge parfaitement polie dans l'échantillon pendant trois heures et à une température dépendant de sa nature. L'examen de cette lame conduit à attribuer une valeur de corrosivité [10].

#### **\* La teneur en sels et chlorures :**

La teneur en sels et chlorures alcalins ou alcalino-terreux des pétroles bruts, est liée en majeure partie à la teneur en eau. On y trouve généralement du NaCl, MgCl<sub>2</sub> et CaCl<sub>2</sub>.

Leur présence en plus grande quantité provient du contact des bruts soit avec l'eau salé du gisement, soit avec l'eau de mer lors des transports [3].

L'essai de détermination de la teneur en chlorures et sels dans les pétroles bruts, se fait selon les normes AFNOR NF M07-023 et IP 71/66.

### \* Résidu de carbone conradson :

Il s'agit de déterminer la quantité de résidu résultant de la pyrolyse d'un produit pétrolier dans des conditions normalisées.

Il donne une indication sur l'importance du résidu de coke laissé par le produit pétrolier lors de sa combustion en vase clos.

L'appareil d'essai comprend essentiellement un petit creuset dans lequel on introduit 1 ou 2 cm<sup>3</sup> d'échantillon. Le creuset est introduit dans un autre plus grand et fermé par un couvercle. Le tout est chauffé énergiquement en vue d'une vaporisation très rapide du produit qui laisse au fond du creuset une petite quantité de coke. On pèse celui-ci et le pourcentage de coke trouvé est l'indice conradson[1].

Les normes qui régissent cet essai sont : AFNOR NF T60-116 et ASTM D189.

## 3. PROPRIETES PHYSIQUES DES HYDROCARBURES

### 3.1 La température d'ébullition [1] et [7] :

L'ébullition est une vaporisation rapide d'un liquide, elle se produit au sein même du liquide et à une température bien déterminée, c'est la température d'ébullition sous une pression bien déterminée.

Pour un corps pur, la température d'ébullition reste constante pendant toute la durée d'ébullition.

Pour un mélange défini de corps purs, la température d'ébullition n'a pas de signification, nous parlerons plutôt de température moyenne d'ébullition, correspondant à la température du point 50 % de la distillation.

Pour un pétrole brut ou une fraction pétrolière il existe divers abaques qui donnent les valeurs de la pente des courbes de distillation TBP et ASTM. Ces incréments sont rajoutés à la température moyenne pondérée  $T_{mav}$ . Nous notons que la température d'ébullition est une propriété additive. Pour un mélange de corps purs, nous pouvons la calculer selon la formule suivante :

$$T_{cb} = \frac{\sum T_{ebi} X_i}{X_i}$$

Où :

$X_i$  : Fraction molaire.

$T_{ebi}$  : Température d'ébullition du constituant  $i$ .

$T_{ebm}$  : Température d'ébullition du mélange.

### 3.2 La densité :

La norme NFT 60-101 est utilisée pour les produits courants. La densité est définie comme le rapport de la masse d'un certain volume d'eau à une température standard (généralement on prend l'eau à une température de 4°C).

La densité d'un corps pur, d'un mélange de corps purs, ou d'une fraction pétrolière est l'une des grandeurs les plus facilement accessible expérimentalement.

Nous pouvons ramener la valeur de la densité à 20°C en partant d'une densité mesurée à une température t de l'échantillon moyennant cette formule de correction

$$d_4^{20} = d_{4t} \pm K(t-20)$$

K est un coefficient qui dépend de la densité du produit[7].  
La densité est une propriété additive.

Les américains utilisent également pour mesurer la densité, le degré API défini par l'Américain petroleum institute, comme une fonction hyperbolique de la specific gravity notée SpGr :

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{SpGr}_{60^{\circ}\text{F}/60^{\circ}\text{F}}} - 131.5$$

Cet indice de densité peut être sujet de confusion. Un pétrole brut de densité élevée possède un poids spécifique faible. Des produits lourds ont un poids spécifique élevé et un degré API faible.

### 3.3 L'indice de réfraction n :

L'indice de réfraction, noté n, caractérise le changement de direction d'une onde passant d'un milieu à un autre. Il est égale au rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction.

Cet indice, mesuré à une température T, est constant pour une irradiation donnée et deux milieux bien définis. Sa détermination est faite généralement par rapport à la raie D jaune du sodium à 20°C (589.3 nm). On le note ainsi :  $n_D^{20}$ .

L'indice de réfraction varie avec la température. En effet, lorsque la température augmente, la densité diminue, par suite, le faisceau lumineux rencontre moins de molécules sur son trajet et l'indice est plus faible. L'effet de la température est donné par la relation suivante :

$$n_D^{20} = n_D^t - a(20 - t)$$

Où:

$$a = 0.0004 \text{ [15].}$$

L'indice de réfraction présente un grand intérêt non seulement pour les corps purs, mais aussi pour les mélanges de corps purs et les fractions pétrolières. Pour les hydrocarbures, l'indice de réfraction est d'autant plus petit que la teneur relative en hydrogène est plus élevée.

L'essai de cette caractéristique fait l'objet de la norme ASTM D1218 (réfractomètre d'ABBE).

### 3.3.1 L'indice de corrélation I :

L'indice de corrélation I, encore appelé facteur de caractérisation de HUANG[16], est défini :

$$I = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}$$

- Valeurs du facteur de caractérisation I:

Famille d'Hydrocarbure	Paraffines	Naphtènes	Aromatiques
Intervalle de I	0.267 - 0.273	0.278 - 0.308	0.298 - 0.362

Tableau 6 : Intervalles de variation de I.

L'indice de corrélation I est estimé à partir de différentes corrélations. Il peut être estimé à partir de la connaissance de la réfraction molaire en écrivant :

$$I = RM * d / M$$

La réfraction spécifique est une propriété qui dépend de l'indice de réfraction, elle est donnée par la relation :

$$R = I / d$$

d est la densité du produit mesuré à la même température que l'indice de réfraction.

### 3.3.2 La réfraction molaire RM :

Le produit de la réfraction spécifique par la masse moléculaire est appelé réfraction molaire.

$$RM = I \frac{M}{d}$$

### 3.4 La viscosité [8] et [9] :

Deux couches contiguës de fluide en mouvement parallèle exercent l'une sur l'autre, par frottement intérieur, une force tangentielle. La viscosité est la force nécessaire par unité de surface, pour maintenir entre deux plans parallèles séparés par l'unité de distance, un gradient de vitesse égal à un.

$$\eta = \frac{dF}{dS} \frac{dZ}{dV}$$

Dans le système CGS, l'unité est la poise (Po).

Dans le système SI, l'unité est le poiseuille (PI).

Nous avons également défini un coefficient de viscosité cinématique noté  $\mu$ .

$$\mu = \eta / \sigma$$

$\sigma$  représentant la masse volumique du fluide.

La détermination de la viscosité cinématique est effectuée par mesure du temps  $t$  d'écoulement du produit entre les deux traits repères d'un tube capillaire calibré. La valeur en centistokes de la viscosité est  $\mu = c t$ , où  $c$  représente la constante de calibrage du tube.

Cet essai fait l'objet des normes Française NFT 60-100 et Américaine ASTM D445-65.

C'est un critère particulièrement important pour apprécier les qualités de pompabilité des produits et définir le type d'écoulement dans les canalisations [1].

### 3.5 La tension superficielle [1] et [4] :

Pour augmenter la surface d'un liquide d'une quantité  $\delta S$ , il est nécessaire pour vaincre les forces de cohésion entre les molécules, de fournir une énergie  $\delta G_s$ .

La grandeur qui caractérise une surface sera le travail à fournir pour augmenter sa surface libre d'une aire unité. Cette grandeur est appelée « tension superficielle » que nous avons noté TS et est exprimée en dynes / cm.

$$TS = (\delta G_s / \delta S)_{T,P}$$

La tension superficielle est une grandeur qui peut être déterminée au laboratoire. L'essai fait l'objet de la norme ASTM D971.50. Pour estimer la tension superficielle des mélanges, nous faisons appel à des corrélations empiriques.

A la température réduite  $0.45 < T_r < 0.65$ , la tension superficielle, pour beaucoup de liquides organiques a une valeur variant de 20 à 40 dynes / cm.

La valeur de la tension superficielle de l'eau est égale à 72.8 dynes / cm à 20°C . Pour les métaux liquides, la tension superficielle est comprise entre 300 et 600 dynes / cm .

### 3 . 6 Le point d'aniline :

Le point d'aniline est la température la plus basse à laquelle des volumes égaux d'aniline et du produit à examiner sont complètement miscibles, la rupture de miscibilité se manifestant par l'apparition d'un trouble net.

Le point d'aniline est en relation avec l'aromaticité du produit et entre dans les formules de caractérisation des différentes propriétés. La mesure du point d'aniline peut se faire au laboratoire. Les valeurs des points d'aniline obtenus avant et après l'élimination des aromatiques peut servir à l'étude de la composition d'une fraction pétrolière.

L'essai de sa détermination est régi par la norme américaine ASTM D611-64 et la norme Française AFNOR : NF M 07.021.

### 3 . 7 La masse moléculaire [4] et [11] :

La masse moléculaire est la plus importante caractéristique physico-chimique de toute substance. Dans le cas des produits pétroliers, ce paramètre présente un intérêt particulier, car il fournit la valeur «moyenne » de la masse moléculaire des corps constituant telle ou telle fraction pétrolière.

La détermination de la masse moléculaire ne pose pas de problèmes pour un corps pur ou pour un mélange de corps purs. Il est en effet possible d'écrire [11] :

$$M = \frac{\sum M_i X_i}{\sum X_i}$$

Où :

$X_i$  : la fraction molaire du constituant  $i$ .

Dans la pratique analytique, on emploie des méthodes cryoscopique, ébullioscopique, ou osmométrique et également la spectrométrie de masse.

Pour une fraction pétrolière, nous avons recours à des abaques, par exemple l'abaque du Kuop proposée par WATSON, NELSON et MURPHY.

## 4 . CALCUL DES PROPRIETES PHYSIQUES

Il existe différentes méthodes de détermination des propriétés physiques pour les corps purs, mélanges de corps purs et fractions pétrolières ( tables, abaques, nomogrammes, corrélations).

Dans ce chapitre nous présenterons les principales corrélations proposées dans la littérature pour l'estimation de ces propriétés physiques.

#### 4.1 La densité :

##### 4.1.1 La densité des corps purs :

Pour la densité des corps purs, différentes corrélations sont utilisées :

###### a- Corrélation de SKander-Chitour(1996): [11]

La corrélation proposée est basée sur la contribution du groupement -CH<sub>2</sub>.

$$d_4^{20} = a + b / [1 + (N/c)^d]$$

Où:

$d_4^{20}$  : densité à 20°

N : nombre d'atomes de carbone

Avec a, b, c,d constantes données pour trois familles d'hydrocarbures. Leurs valeurs sont données dans le tableau suivant :

Famille	a	b	c	d
Paraffines	0.069565408	0.77788982	2.1733177	-1.1293012
Naphtènes	0.74856893	0.091408515	9.3554691	-2.2602122
Aromatiques	0.85429415	1.290834	1.6227784	3.0424987

Tableau 7 : les valeurs des constantes a, b, c et d.

Ces corrélations peuvent être appliquées aux mélanges et fractions pétrolières par le biais des règles de mélanges si on connaît la composition en différentes familles d'hydrocarbures.

###### b- Corrélation de Dermoune-Chitour(1990) : [13]

Ces corrélations sont valables pour les fractions pétrolières légères dont les températures d'ébullition sont :

. Paraffines :  $35 < T_{eb} < 175$  °c.

. Naphtènes :  $50 < T_{eb} < 185$  °c.

. Aromatiques :  $80 < T_{eb} < 185$  °c.

Elles sont basées sur la compilation des valeurs données par l'API projet 44, pour les différentes familles d'hydrocarbures.

$$\ln(d_p) = 7075 \cdot 10^{-4}M + 3.835 \cdot 10^{-4}T_{eb} + 0.5613$$

$$\ln(d_N) = 1.887 \cdot 10^{-4}M + 1.044 \cdot 10^{-4}T_{eb} + 0.7469$$

$$\ln(d_A) = -1.889 \cdot 10^{-4}M - 1.005 \cdot 10^{-4}T_{eb} + 0.8965$$

Où:

- $d_p$  : densité de la paraffine
- $d_N$  : densité du naphène
- $d_A$  : densité de l'aromatique
- $T_{cb}$  : température d'ébullition
- $M$  : masse molaire

#### c- Corrélation de Bouamra-Chitour(1991) : [19]

Ces corrélations sont valables pour les fractions pétrolières lourdes à partir de 200°C.

$$d_p = -14.3 \cdot 10^{-11} T_{cb}^3 - 7.73 \cdot 10^{-8} T_{cb}^2 + 49.44 \cdot 10^{-5} T_{cb} + 0.840$$

$$d_N = 29.8610 \cdot 10^{-11} T_{cb}^3 - 7.72 \cdot 10^{-7} T_{cb}^2 + 72.65 \cdot 10^{-5} T_{cb} + 0.5995$$

$$d_A = -1.457 \cdot 10^{-8} T_{cb}^3 + 2.86 \cdot 10^{-5} T_{cb}^2 - 1.87 \cdot 10^{-2} T_{cb} + 0.490$$

#### 4.1.2 La densité des mélanges de corps purs :

##### Règle d'additivité :

La densité est une propriété additive. Il est donc possible de la calculer pour n'importe quel mélange de corps purs, connaissant sa composition qualitative et quantitative, en sommant la densité de chaque constituant :

$$d = \sum X_i d_i$$

Où:

- $X_i$  : fraction volumique de constituant i.
- $d_i$  : densité du constituant i

#### 4.1.3 La densité des fractions pétrolières:

##### Règle d'additivité :

la densité des fractions pétrolières peut être facilement déterminée expérimentalement. Elle peut aussi être estimée par des corrélations, connaissant la composition molaire en paraffines(P), naphènes(N), aromatiques(A). La densité moyenne de la fraction pétrolière est calculée en admettant l'additivité des densités des fractions, soit:

$$d = X_p \cdot d_p + X_N \cdot d_N + X_A \cdot d_A$$

Les corrélations de type Skander-Chitour, Dermoune-Chitour (fractions pétrolières à  $T_{mav} < 200^\circ\text{C}$ ) et Bouamra-Chitour (fractions pétrolières à  $T_{mav} > 200$ ) peuvent être utilisées en considérant la fraction pétrolière comme une paraffine, puis un naphène et en fin un aromatique.

## 4.2 L'indice de réfraction:

### 4.2.1 L'indice de réfraction des corps purs:

L'indice de réfraction des corps purs, disponible dans les tables, varie avec la nature chimique et la masse moléculaire des hydrocarbures. A nombre égal d'atome de carbone, l'indice croît des paraffines aux aromatiques, les naphthènes et les oléfines ayant des valeurs intermédiaires. A l'intérieur d'une même famille, l'indice de réfraction varie régulièrement avec la masse moléculaire, il croît pour les hydrocarbures saturés et diminue pour les hydrocarbures aromatiques.

Différentes formules empiriques ont été proposées pour estimer l'indice de réfraction des corps purs, parmi elles :

#### a- Equation de Smittenberg [2] :

$$n_D^{20} = 1.4752 + \frac{K}{M + C}$$

Où :

M : masse molaire du corps considéré .

K, C : constantes dépendant de la famille de l'hydrocarbure considéré.

#### b- Corrélation de Lorentz-Lorenz [16] :

$$n_D^{20} = [(2 \cdot R_D + V) / (V - R_D)]^{1/2}$$

Où :

$R_D$  : la réfraction molaire évaluée en sommant les contributions de groupe .

V : volume molaire.

### 4.2.2 L'indice de réfraction des mélanges de corps purs:

#### a- Règle d'additivité :

L'indice de réfraction est une propriété additive dans un intervalle étroit de température. Pour un mélange de corps purs, on peut la calculer comme suit :

$$n_D^{20} = \sum X_i \cdot n_i$$

Où :

$X_i$ : fraction molaire ou massique.

$n_i$ : indice de réfraction du constituant i.

#### b- corrélation de Riazi-Daubert (1980) : [20]

Riazi et Daubert proposent une corrélation basée sur la connaissance de l'indice de corrélation I (paramètre de Huang) :

$$n = [(2 * I + 1) / (1 - I)]^{1/2}$$

$$I = 1.896 \cdot 10^{-3} \cdot T_{eb}^{1.0848} (M/d)^{-0.4439}$$

Où:

T<sub>eb</sub> : température d'ébullition en °R

M : masse molaire

d : densité

#### 4.2.3 L'indice de réfraction des fractions pétrolières :

##### Règle d'additivité :

La règle d'additivité précédente (celle des mélanges) est applicable aux fractions pétrolières dont on connaît la composition qualitative et quantitative.

#### 4.3 La viscosité :

##### 4.3.1 La viscosité des corps purs :

Parmi les équations empiriques proposées pour estimer la viscosité des corps purs, nous citons :

##### a- Equation de Souders : [21]

$$\text{Log}(\text{Log}(10 \cdot \eta)) = I \cdot \rho_L / M - 2.900$$

$\eta$  : viscosité absolue (cP).

I : facteur de contribution.

$\rho_L$  : densité du liquide (g/cm<sup>3</sup>).

M : masse moléculaire.

##### b- Equation d'Orrick-Erbar : [22]

La méthode de Orrick-Erbar relie la viscosité à la densité, la température et la masse moléculaire ; elle est dérivée de l'équation d'Antoine :

$$\text{Ln}(\eta_L / \rho \cdot M) = A + B/T$$

Avec :

$$A = (-6.95+0.21*n)+CG$$

$$B = (275+99*n)+CG$$

Où :

$\eta$ : viscosité liquide,(cP).

$\rho$  : masse volumique(g/cm<sup>3</sup>).

M : masse moléculaire.

T : température(K).

CG : contribution de groupe, donnée dans le tableau 1 .

n: nombre d'atomes de carbone, autres que ceux donnés dans le tableau 1.

Cette méthode est valable pour les liquides purs à température modérée.  
L'équation a été testée sur 188 liquides organiques, l'erreur maximale est de 15%.

Groupement	A	B
Atomes de carbone	-6.95-0.21*n	275+99*n
R3-C	-0.15	0.35
R4-C	-1.2	400
C6-H12	-0.45	250
C6-H6	0	20
-OH	-3	1600
-COOH	-0.9	770

Tableau 8 : Valeurs des paramètres A et B de l'équation de Orrick-Erbar.

### c- Corrélation de Zidelkhier-Chitour : [23]

Les corrélations proposées par Zidelkhier et Chitour sont basées sur les méthodes de contributions de groupes, elles consistent à déduire la viscosité absolue, pour un hydrocarbure appartenant à une famille donnée, en fonction de son nombre d'atomes de carbone.

Elles sont données par les équations suivantes :

$$\eta_p = -0.045+0.0633*N-0.0066*N^2+0.00093*N^3$$

$$\eta_N = 0.5825-0.0834*N+0.0056*N^2+0.00077*N^3$$

$$\eta_A = 0.8453-0.11003*N+0.00697*N^2+0.00043*N^3+1.09805.10^{-5}*N^4$$

Où:

N : Nombre d'atomes de carbone moyen de l'hydrocarbure ou de la fraction.

Signalons qu'il existe une corrélation qui permet d'estimer ce nombre d'atomes de carbone.(celle de l'ECN).

$\eta$  : viscosité dynamique, cP.

En toute rigueur ces corrélations ne sont valables que pour des hydrocarbures purs. La viscosité de la fraction pétrolière est déduite en appliquant la règle d'additivité suivante :

$$\text{Log}(\text{Log } \eta) = \text{Log}[\text{Log}(\eta_p * X_p) + \text{Log}(\eta_N * X_N) + \text{Log}(\eta_A * X_A)]$$

Où :

$\eta_P, \eta_N, \eta_A, X_P, X_N, X_A$  : viscosités dynamiques et fractions molaires respectivement des paraffines, naphthènes et aromatiques.

#### d - Corrélation de Skander-Chitour : [17]

Cette corrélation proposée par ces auteurs, a l'avantage d'être plus maniable (polynôme de degré 3). Elle est obtenue à partir des données de l'API pour les corps purs ainsi que des données du D.I.P.P.R. elle peut être appliquée aux fractions pétrolières.

$$\eta_{100F} = a + b.N + c.N^2 + d.N^3$$

Où :

$\eta$  : viscosité dynamique en cP.

a, b, c et d : des constantes qui varient selon N.

- pour  $7 < N < 16$  :

Familles	a	b	c	d
Paraffines	0.13248446	-0.0023764687	0.0016079468	0.00044763445
Naphtènes	1.7080095	-0.36948669	0.030080171	-4.0188134.10 <sup>-5</sup>
aromatiques	0.82514028	-0.15148439	9.22385513	0.00021028015

Tableau 9 : valeurs des constantes a, b, c et d.

- pour  $16 < N < 30$  :

Familles	a	b	C	d
Paraffines	-6.9324419	-1.1957789	-0.060902763	0.0014056243
Naphtènes	-44.525051	6.7594952	-0.3343021	0.006151978
aromatiques	-27.85911	4.2979711	-0.21661561	0.0041620594

Tableau 10 : valeurs des constantes a, b, c et d.

#### 4.3.2 La viscosité des mélanges de corps purs :

La viscosité est une propriété non additive, cependant certains auteurs préconisent une pondération basée sur l'additivité de Log-Log de la viscosité des différents composés d'un mélange, que multiplie leurs fractions volumiques. Différentes méthodes ont été proposées pour estimer la viscosité d'un mélange de composition qualitative et quantitative connue, nous citerons l'une des équations les plus courantes :

##### a- Corrélation de Kendall-Monroe : [24]

L'équation suivante proposée par Kendall-monroe est valable pour des mélanges de composés purs ; L'erreur commise atteint 8%.

$$\eta_m = (\sum X_i * \eta_i^{1/3})^3$$

Où :

$X_i$  : fraction molaire.

$\eta$  : viscosité absolue, en centipoise.

#### b- L'équation d'Arrhenius:

$$\text{Log } \eta = \sum X_i \text{ Log } \eta_i$$

Où :

$X_i$  : fraction molaire ou volumique .

$\eta$  : viscosité du mélange en cP .

$\eta_i$  : viscosité du constituant i en cP.

#### 4.3.3 La viscosité des fractions pétrolières :

##### a- Corrélation de Beg-Amin-Hussein : [25]

Cette corrélation fait appel à la connaissance de deux grandeurs : la densité API et la température. Elle est donnée par :

$$v = A \cdot \exp(B/T)$$

Où :

$v$  : viscosité cinématique en centistokes.

$T$  : Température absolue, en K.

$A, B$  : deux constantes données par les relations suivantes :

$$A = -0.0339 \cdot (\text{API})^{0.88} + 0.241 \cdot (T_{eb}/B)$$

$$B = \text{Exp}(5.471 + 0.00342 \cdot T_{eb})$$

Où :

$T_{eb}$  : Température d'ébullition à 50%vol, en K.

API : Densité de la substance.

##### b- Corrélation de l'API : [26]

L'américain pétroleum Institut propose une corrélation basée sur la connaissance de deux grandeurs, le Kuop et la densité API, elle est de la forme suivante :

$$\text{Log}(v_{100^\circ\text{F}}) = -1.2926 + 9.461 \cdot 10^{-3} \text{ Kuop} + \frac{3.0522 \text{ Kuop} + 9.9538 \cdot 10^{-2} \text{ Kuop}}{\text{API}}$$

$$API + 113.74 - 10.216Kuop$$

$$\text{Log}(v_{210^{\circ}\text{F}}) = -0.878 + \frac{3.0952Kuop - 5.8946}{API + 121.12 - 10.725Kuop}$$

Les résultats donnés par ces équations sont acceptables et l'API la recommande pour le calcul, son avantage est de nécessiter en définitive que la densité et la  $T_{\text{max}}$ .

#### e- Equation de Mehotra (1991) : [27]

Cet auteur propose une équation assez fiable et qui peut être extrapolée aux hydrocarbures lourds.

$$\text{Log}(\eta + 0.8) = 100 * (0.01 * T)^b$$

Où :

$\eta$ : viscosité dynamique en mPa.s.

T : température absolue en K.

b : paramètre déterminé en fonction du nombre d'atomes effectif (ECN) :

$$b = -5.745 + 0.616 * \ln(\text{ECN}) - 40.468 * (\text{ECN})^{-1.5}$$

ECN est l'Equivalent Carbon Number, c'est à dire le nombre d'atomes de carbone moyen qui représente un mélange ou une fraction pétrolière.

### 4.4 La tension superficielle :

#### 4.4.1 La tension superficielle des corps purs :

L'estimation des tensions superficielles des corps purs fait appel à des corrélations empiriques dont les plus importantes sont :

#### a- Corrélation de Macleod-Sudgen : [28]

Macleod et Sudgen en 1923 ont suggéré une relation entre la tension superficielle et les masses volumiques du liquide et de la vapeur.

$$TS^{1/4} = [P] * (d_l - d_v)$$

Où :

TS : tension superficielle en dynes/cm à une température donnée .

$d_l, d_v$  : masses volumiques en g.mole/cm<sup>3</sup> du liquide et de la vapeur à une température donnée .

[P] : parachor, indépendant de la température, mais dépendant de la nature de la molécule.

Il a été suggéré une méthode additive pour corrélérer [P] à la structure de la molécule. Les contributions des groupements de la molécule pour le calcul du parachor sont données dans le tableau suivant :

Groupements	$\Delta[P]$	groupements	$\Delta[P]$	groupements	$\Delta[P]$
<b>Carbone - hydrogène</b>		Groupes spéciaux		O	20.0
C	9.0	-COO-	63.8	P	40.5
H	15.5	-COOH	73.8	F	26.1
CH <sub>3</sub> -	55.5	-OH	29.8	Cl	55.2
-CH <sub>2</sub> -	40.0	-NH <sub>2</sub>	42.5	Br	68.0
-(CH <sub>2</sub> -), n>12	40.3	-O-	20.0	I	90.3
CH <sub>3</sub> -CH(CH <sub>3</sub> )-	133.3	-NO <sub>2</sub> (nitrite)	74.0	Ethylenic bond	
CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH(CH <sub>3</sub> )-	171.9	-NO <sub>3</sub> (nitrate)	93.0	Terminal	19.1
CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> - CH(CH <sub>3</sub> )-	211.7	-CO(NH <sub>2</sub> )	91.7	2,3 position	17.7
CH <sub>3</sub> -CH(CH <sub>3</sub> )-CH <sub>2</sub> -	173.3	=O(cétone)		3,4 position	16.3
CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )-	209.5	3 atomes de C	22.3	Triple bond	40.6
CH <sub>3</sub> -C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -	170.4	4 atomes de C	20.0	Cycle fermé	
CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -	207.5	5 atomes de C	18.5	Three memberd	12.5
CH <sub>3</sub> -CH(CH <sub>3</sub> )- CH(CH <sub>3</sub> )-	207.9	6 atomes de C	17.3	Four-memberd	6.0
CH <sub>3</sub> -CH(CH <sub>3</sub> )- C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -	243.5	N	17.5	Five-memberd	3.0
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub>	189.6	S	49.1	Six-memberd	0.8

**Tableau 11** : valeurs de contribution des groupement d'une molécule.

Une autre équation a été proposé par Pedersen, Lund, Fredenslund et qui permet de calculer le parachor pour les hydrocarbures et fractions pétrolières supérieurs à C7(C7+), elle est de la forme :

$$\text{Log}[P] = -8.93275 + 3.688941 \log_{10}(T_c/S^{0.6676})$$

Où:

T<sub>c</sub> : Température critique .

S : Specific-gravity.

Baker et Swerdloff donnent une relation entre le parachor et la masse molaire :

$$[P] = 40 + 2.38 * M$$

### b- Corrélation de Goldhammer : [29]

$$TS = ([P] * d_{lb})^{4n} * (1 - Tr) / (1 - Tebr)^{4n}$$

Où :

4n : varie entre 1.0 et 1.24 .

d<sub>lb</sub> : masse volumique du liquide à Teb (g.mole/cm<sup>3</sup>) .

Tr : température réduite égale à T/T<sub>c</sub> .

Teb : température d'ébullition normale en K .

Tebr : température d'ébullition réduite égale à Teb/T<sub>c</sub> .

T : température en K .  
T<sub>c</sub> : température critique en K .

c- **Corrélation de la loi des états correspondants : [30]**

Brock et Bird, en utilisant les lois des états correspondants, proposent pour les liquides non polaires l'équation suivante :

$$TS/(P_c^{2/3} * T_c^{1/3}) = (0.133 * \alpha_c^\phi - 0.281) * (1 - Tr)^{11/9}$$

Où :

P<sub>c</sub> : pression critique (atm) .  
T<sub>c</sub> : température critique (K) .  
Tr = T / T<sub>c</sub> .  
Tebr = Teb / T<sub>c</sub> .

$$\alpha_c = 0.9076 * (1 + (Tebr * \ln P_c) / (1 - Teb))$$

$$\phi = 0.1207 * (1 + (Tebr * \ln P_c) / (1 - Tebr)) - 0.281$$

$$TS = P_c^{2/3} * T_c^{1/3} * \phi * (1 - Tr)^{11/9}$$

D'où la relation :

$$TS_1 / TS_2 = [(1 - Tr_1) / (1 - Tr_2)]^{11/9}$$

d- **Corrélation de Meissner et Michaels : [31]**

Meissner et Michaels ont corrélé la tension superficielle en fonction du parachor et de l'indice de réfraction.

$$TS = [([P] / R_m) * ((n^2 - 1) / (n^2 + 2))]^4$$

Où :

N : indice de réfraction .  
R<sub>m</sub> : réfraction molaire .  
[P] : parachor.

#### e- Corrélation de Skander-Chitour : [18]

Ces auteurs proposent des corrélations pour la prédiction des tensions superficielles des hydrocarbures de type n-alcanes, n- alkyl cyclohexanes et n- alkyl benzènes connaissant seulement le nombre d'atomes de carbone. Les données de références sont celles du D.P.P.R.(Design Institute for Physical Properties Resarch.U.S.A).

Les équations proposées sont de la forme :

$$TS = a + \frac{b}{1+(N/c)^d}$$

Les constantes a,b,c et d sont données pour chaque famille dans le tableau suivant :

Familles chimiques	a	b	c	d.
n-alcanes	-15.489187	49.980704	3.125045	-1.0720868
n-alkylcyclohexanes	22.298482	9.014923	10.633427	-2.1806274
n-alkylbenzènes	27.694314	2.7062063	9.2238513	-3.7531335

Tableau 12 : valeurs des constantes a, b, c et d

#### 4.4.2 La tension superficielle des mélanges de corps purs :

- Variation de la tension superficielle à basse pression :

La tension superficielle d'un mélange liquide n'est pas une fonction simple des tensions superficielles des divers constituants, car dans un mélange, la composition à la surface n'est pas identique à celle existant au sein du liquide. Nous pouvons en première approximation admettre l'additivité des propriétés. Pour estimer la tension superficielle d'un mélange, il est fait appel à des corrélations empiriques :

##### a- Corrélation de Macleod-Sudgen : [28]

$$TS^{1/4} = \sum [Pi] (\rho_{ml} Xi - \rho_{mv} Yi)$$

Où :

[Pi] : parachor du constituant i .

Xi et Yi : fractions molaires du constituant i dans la phase liquide et dans la phase vapeur .

$\rho_{ml}$  : densité du mélange liquide en g molè / cm3 .

$\rho_{mv}$  : densité du mélange vapeur en g mole / cm3 .

##### b- Corrélation de Macleod-Sudgen modifiée : [32]

Ces auteurs proposent une relation de la forme suivante :

$$TS^{1/4} = d_{ml} * \sum (Xi * TSi^{1/4}) / d_{li}$$

Où :

TS : tension supérficielle du mélange en dynes/cm .

TSi : tension supérficielle du constituant i .

$d_{ml}$  : densité du mélange liquide .  
 $d_{li}$  : densité du constituant i liquide.

• **Variation de la tension superficielle pour des pressions élevées :**

Pour les mélanges définis et à haute pression, la tension superficielle peut se calculer par l'expression suivante donnée par Weinaug et Katz.

**c- Corrélation de Weinaug et Katz : [33]**

$$TS_m = [ \sum [Pi] * ((d_l / M_l) * X_i - (d_v / M_v) * Y_i) ]^4$$

Où :

$TS_m$  : tension superficielle du mélange.

$[Pi]$  : parachor du constituant i.

$M_l$  : masse molaire du mélange liquide .

$M_v$  : masse molaire du mélange vapeur .

$d_l$  : densité du mélange liquide .

$d_v$  : densité du mélange vapeur .

$X_i$  : fraction molaire du constituant i dans la phase liquide .

$Y_i$  : fraction molaire du constituant i dans la phase vapeur.

Les coordonnées de X et Y en fonction de la température pour différents hydrocarbures sont données dans le tableau suivant :

Corps purs	X	Y	Domaine(°F)	Corps purs	X	Y	Domaine(°F)
<b>Paraffines</b>				<b>Oléfines</b>			
n-hexane	2.925	2.430	14 à 140	1-héxène	2.970	2.440	32 à 140
n-heptane	2.700	3.200	32 à 48	1-heptène	2.760	3.210	32 à 176
n-octane	2.625	3.730	14 à 320	1-octène	2.660	3.770	32 à 212
n-nonane	2.495	4.250	-22 à 302	1-nonène	2.450	4.320	32 à 140
n-décane	2.390	4.640	-4 à 248	1-décène	2.390	4.710	32 à 176
n-undécane	2.250	5.060	-4 à 248	1-undécène	2.300	5.070	32 à 212
n-dodécane	2.180	5.340	32 à 248	1-dodécène	2.210	5.390	32 à 140
n-tridécane	2.130	5.560	32 à 248	1-tridécène	2.160	5.610	32 à 176
n-tétradécane	2.100	5.790	50 à 248	1-tétradécène	2.160	5.890	32 à 212
n-pentadécane	2.060	6.010	68 à 248	1-pentadécène	2.090	6.030	32 à 212
n-eicosane	1.980	6.720	68 à 248	<b>Aromatiques</b>			
<b>Naphtènes</b>				benzène	3.510	5.000	50 à 464
cyclopentane	3.270	3.380	32 à 104	méthyl-benzène	3.050	5.370	32 à 212
méthyl-cyclopentane	3.330	3.340	32 à 140	éthyl-benzène	2.760	5.850	32 à 212
diméthyl-cyclopentane	1.750	3.620	32 à 140	n-propyl-benzène	2.700	5.900	32 à 212
cyclohexane	3.210	4.190	50 à 140	n-butyl-benzène	2.640	6.020	59 à 104
méthyl-cyclohexane	2.900	4.100	32 à 122	n-pentylbenzène	2.330	6.420	55.8 à 104
ethyl-cyclohexane	2.840	4.770	32 à 140	n-hexyl-benzène	2.130	6.790	68 à 104
n-propyl-cyclohexane	2.700	5.100	68 à 140	n-décy-benzène	1.680	7.440	54 à 212

**Tableau 13:** les coordonnées de X et Y.

#### 4.4.3 La tension superficielle des fractions pétrolières :

Il existe plusieurs corrélations qui peuvent être appliquées aux mélanges complexes que sont les fractions pétrolières, les plus utilisées sont les suivantes :

##### a- Corrélation de Pedersen, Lund, Fredenslund : [34]

Ces auteurs proposent une corrélation qui donne la tension superficielle d'un mélange pétrolier.

$$\ln TS = \ln A + B/\mu$$

Où :

$$A = \sum w_i (C_1 * P_i + C_2 * N_i + C_3 * A_i)$$

$$B = \sum w_i (C_4 * P_i + W_i^{C_7} + C_5 * N_i * M^{C_8} + C_6 * A_i * M^{C_9})$$

Les constantes A et B sont des fonctions en aromaticité et masse molaire.

M : masse molaire du mélange pétrolier .

W<sub>i</sub> : masse du mélange pétrolier .

P, N et A sont les fractions molaires en paraffines, naphènes et aromatiques des constituants.

Les valeurs optimales de C<sub>i</sub> en utilisant les données expérimentales sont les suivantes :

$$C_1 = 3.118 \text{ E-2} ; C_2 = 2.805 \text{ E-2} ; C_3 = 3.673 \text{ E-2} ; C_4 = -3.282 \text{ E-5}$$

$$C_5 = -6.096 \text{ E-9} ; C_6 = -6.098 \text{ E-7} ; C_7 = 3.641 \text{ E-1} ; C_8 = 2.191 ; C_9 = 1.229$$

TS : tension superficielle en dynes/cm .

μ : viscosité en Pa.s.

Cette équation donne une déviation moyenne comprise entre 2.2 et 13.0 %.

##### b- Equation de Sanborn et Evans : [35]

Pour les fractions pétrolières, ces deux auteurs donnent l'équation suivante :

$$S = (673.7/Kuop) * (1 - (T/Tc))^{1.232}$$

$$Kuop = (Teb \text{ en } ^\circ R)^{1/3} / SpGr_{60/60}$$

Où :

K : facteur de caractérisation de Watson (Kuop).

T<sub>c</sub> : température critique absolue .

T<sub>eb</sub> : température d'ébullition absolue .

TS : tension superficielle en dynes/cm .

SpGr : specific gravity 60/60 °F.

Cette corrélation peut être appliquée aussi pour des corps purs.

#### c- Utilisation des méthodes d'additivité :

Connaissant la composition du mélange complexe ou de la fraction pétrolière, il est possible de déduire la propriété moyenne en considérant en première approximation, l'additivité de la propriété. Cela veut dire que les coefficients d'interaction binaires sont supposés être nuls, il n'y a de ce fait pas de grandeurs d'excès :

$$T_{Smel} = \sum T_{Si} * X_i$$

Où :

$T_{smel}$  : tension superficielle du mélange .

$T_{Si}$  : tension superficielle du constituant  $i$  .

$X_i$  : composition massique, molaire ou volumique du constituant  $i$ .

#### 4.5 Le point d'aniline :

##### 4.5.1 Le point d'aniline des corps purs :

Pour les corps purs, nous citerons deux corrélation : Dermoune-Chitour et Skander-Chitour.

#### a- Corrélation de Dermoune-Chitour : [18]

Ces auteurs proposent une corrélation pour chaque famille d'hydrocarbures paraffines (P), naphthènes (N) et aromatiques (A). Les données sont prises de l'API Technical Data Book (Edition révisée 1983). Ces corrélation sont valables pour des hydrocarbures dont les points d'ébullition n'excèdent pas en moyenne 185°C.

- **Paraffines :** 35 <Teb < 175°C .

$$PA = -5.29054623844 * 10^{-9} * Teb^5 + 2.89268479613 * 10^{-6} * Teb^4 \\ - 0.000600789639554 * Teb^3 + 0.0594427801177 * Teb^2 \\ - 2.772625836557 * Teb + 116.988367606$$

- **Naphtènes:** 50 <Teb < 185°C .

$$PA = -3.13913913596387 * 10^{-8} * Teb^5 + 1.8588985273 * 10^{-5} * Teb^4 \\ - 0.00424060550941 * Teb^3 + 0.450993019136 * Teb^2 \\ - 22.249927147 * Teb + 421.42192105$$

- **Aromatiques:** 80 <Teb < 185°C .

$$PA = -2.28248909658 * 10^{-7} * Teb^4 + 0.000132767370641 * Teb^3 \\ - 0.0285984706283 * Teb^2 + 2.74435945329 * Teb - 112.168843723$$

Où :

PA : point d'aniline en °C .

Teb : température d'ébullition en °C.

#### b- Corrélation de Skander-Chitour : [17]

Ces auteurs ont proposé une corrélation donnant le point d'aniline en fonction de nombre d'atomes de carbone pour les n-paraffines, les n-alkyl cyclohexanes et les n-alkyl benzènes.

$$PA = a + b / (1+(N/c)^d)$$

Où:

PA : point d'aniline .

N : nombre d'atomes de carbone .

a, b, c et d : paramètres qui dépendent de la propriété et de la famille chimique de l'hydrocarbure étudié. Leurs valeurs sont données dans le tableau suivant :

PA (°C)	a	b	c	d
n-paraffines	333.64213	97.486266	22.396911	-2.0066929
Naphtènes	296.00338	97.638592	12.98634	-2.7272983
Aromatiques	237.028	634.49156	50.006516	-2.3025448

Tableau 14 : valeurs des paramètres a, b, c et d.

#### 4.5.2 Le point d'aniline des mélanges de corps purs :

##### Règle d'additivité :

Connaissant la composition du mélange , il est possible de déduire la propriété moyenne en considérant l'additivité de la propriété, cela veut dire que les coefficients d'interaction binaires sont supposée être nuls, il n'y a de ce fait pas de grandeurs d'excès :

$$PA_{mel} = \sum PA_i \cdot X_i$$

Où :

PA<sub>mel</sub> : point d'aniline du mélange .

PA<sub>i</sub> : point d'aniline du constituant i .

X<sub>i</sub> : la fraction massique, molaire ou volumique du constituant i.

#### 4.5.3 Le point d'aniline des fractions pétrolières :

Le point d'aniline d'une fraction pétrolière peut être estimé par les corrélations suivantes :

##### a- Corrélation de R.P.Walsh et J.V.Mortimer : [36]

$$PA = -204.9 - 1.498(N_{c50}) + 100.5[(N_{c50})^{1/3} / d]$$

Où :

PA : point d'aniline de la fraction en °C ;

$N_{C50}$  : le nombre d'atomes de carbone de la normale paraffine à 50% ;

d : densité relative à la fraction.

#### b- Corrélation de Robert : [10]

$$PA = \frac{M-1705.45 n_D^{20} - 792.93 d_4^{20} + 3287}{4.553} + 273.15$$

Où :

$n_D^{20}$  : indice de réfraction à 20°C .

$d_4^{20}$  : densité à 20°C .

M : masse molaire.

### 4.6 Les propriétés critiques et pseudo critiques :

#### 4.6.1 Les propriétés critiques des corps purs :

Le point critique d'un corps pur définit la limite supérieure de la courbe de tension de vapeur, au delà de laquelle le changement de phase n'est plus observé. En ce point particulier, propre à chaque corps, la chaleur de vaporisation devient nulle. Les propriétés critiques des corps purs sont définies et tabulées.

Il existe cependant des équations empiriques permettant d'estimer les propriétés critiques des corps purs.

#### Méthode de Lydersen [14] :

$$T_c = T_{eb} [0.567 + \Delta T - (\Delta T)^2]^{-1}$$

$$P_c = M [0.34 + \Delta P]^{-2}$$

$$V_c = 40 + \Delta V$$

Où:

$T_c$  : température critique en K.

$P_c$  : pression critique en atm.

$V_c$  : volume critique en  $\text{cm}^3/\text{gmole}$ .

M : masse molaire en g/mole.

Les entités  $\Delta T$ ,  $\Delta P$  et  $\Delta V$  sont calculées par sommation des incréments relatifs à chaque groupement d'atomes.

#### 4.6.2 Les propriétés pseudo critiques des mélanges de corps purs

##### Règle de KAY :

Pour les mélanges de corps purs, de composition connue, on pondère les coordonnées critiques vraies des hydrocarbures purs, selon la règle de KAY (pondération molaire).

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

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

$$V_{pc} = \sum X_i V_{ci}$$

Où :

$T_{pc}$  : température pseudo critique .

$P_{pc}$  : pression pseudo critique .

$V_{pc}$  : volume pseudo critique.

$T_{ci}$  : température critique vraie du constituant  $i$  .

$P_{ci}$  : pression critique vraie du constituant  $i$  .

$V_{ci}$  : volume critique vrai du constituant  $i$ .

$X_i$  : fraction molaire du constituant  $i$  dans le mélange[15].

#### 4.6.3 Les propriétés pseudo critiques des fractions pétrolières :

Par analogie avec les corps purs, les fractions pétrolières possèdent un point pseudo critique situé à la jonction de la courbe de bulle et de la courbe de rosée.

Différentes méthodes existent et qui permettent de calculer les propriétés critiques des fractions pétrolières. On va citer les méthodes suivantes :

##### a- Corrélation de Riazi-Daubert :

La corrélation proposée par ces deux auteurs est très utilisée, elle est de la forme :

$$T_{pc} = 24.2787 t_{mav}^{0.58845} SpGr^{0.3596}$$

$$P_{pc} = 3.12281 \cdot 10^9 t_{mav}^{-2.3125} SpGr^{2.3201}$$

$$V_{pc} = 7.5214 \cdot 10^{-3} t_{mav}^{0.2836} SpGr^{-0.7666}$$

Où:

$T_{pc}$  : température pseudo critique en °R.

$P_{pc}$  : pression pseudo critique en Psia.

$V_{pc}$  : volume pseudo critique en ft<sup>3</sup>/Lb.

$t_{mav}$ : température d'ébullition moyenne de la fraction pétrolière en °R.

### b- Règle d'additivité :

Connaissant la composition de la fraction pétrolière en paraffines, naphènes et aromatiques, on utilise l'additivité pour estimer les propriétés critiques moyennes des fractions considérées :

$$T_c = T_{cP} X_P + T_{cN} X_N + T_{cA} X_A$$

$$P_c = P_{cP} X_P + P_{cN} X_N + P_{cA} X_A$$

$$V_c = V_{cP} X_P + V_{cN} X_N + V_{cA} X_A$$

Où :

$T_c$  : température critique moyenne de la fraction.

$P_c$  : pression critique moyenne de la fraction.

$V_c$  : volume critique moyen de la fraction.

$T_{cP}, T_{cN}, T_{cA}$  : températures critiques des paraffines, naphènes et aromatique.

$P_{cP}, P_{cN}, P_{cA}$  : pressions critiques des paraffines, naphènes et aromatique.

$V_{cP}, V_{cN}, V_{cA}$  : volumes critiques des paraffines, naphènes et aromatique.

$X_P, X_N, X_A$  : compositions molaires des paraffines, naphènes et aromatique.

## 1 . INTRODUCTION

Dans cette étude, nous avons dans une première étape procédé à l'acquisition d'une banque de données expérimentale de quelques propriétés physiques d'une soixantaine de mélanges binaires et ternaires. Les propriétés mesurées sont la densité à 20°C, l'indice de réfraction à 20°C, la viscosité cinématique à 20°C, la tension superficielle à 20°C et en fin le point d'aniline.

Dans une seconde étape, nous avons tenté de retrouver ces propriétés en utilisant différentes règles de mélange (moyenne arithmétique, moyenne géométrique, moyenne cubique, moyenne logarithmique et la moyenne harmonique) et en prenant les compositions massiques, molaires et volumiques. Les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs expérimentales d'une part et d'autre part aux valeurs des propriétés calculées par certaines corrélations de la littérature.

Enfin, dans la troisième partie, nous avons tenté de corriger les règles de mélanges classiques en proposant de nouvelles équations afin de réduire les écarts obtenus par rapport à l'expérience.

## 2 . MESURE DES PROPRIETES PHYSIQUES

### 2.1 Préparation des mélanges :

Pour réaliser ce travail, nous nous sommes limités aux mélanges binaires et ternaires d'hydrocarbures purs de mêmes familles et de familles chimiques différentes. De même, que nous avons fait varier la composition des différents mélanges.

Pour cela, nous avons utilisé trois familles de corps purs :

- **Les paraffines :**

Les produits utilisés sont : n. hexane (  $C_6H_{14}$  ), n. heptane (  $C_7H_{16}$  ), n. nonane (  $C_9H_{20}$  ), n. décane (  $C_{10}H_{22}$  ), n. undécane (  $C_{11}H_{24}$  ), n. dodécane (  $C_{12}H_{26}$  ), n. tridécane (  $C_{13}H_{28}$  ), n. tétradécane (  $C_{14}H_{30}$  ), n. pentadécane (  $C_{15}H_{32}$  ).

- **Les naphènes :**

Les produits utilisés sont : Cyclohexane (  $C_6H_{12}$  ), Methylcyclohexane (  $C_7H_{14}$  ).

- **Les aromatiques :**

Les produits utilisés sont : Benzène (  $C_6H_6$  ), Toluène (  $C_7H_8$  ), Ethylbenzène (  $C_8H_{10}$  ).

#### 2.1.1 Les étapes de préparation :

Les mélanges ont été préparés par pesée des produits purs. Leurs compositions sont données dans les **tableaux 1 et 2** :

63 mélanges ont été préparés : **41** binaires **et 22** ternaires.

- Les mélanges binaires :

N°	C1	C 2	m1	m2	n1	n2	v1	v2
1	nC6	nC7	48.49	51.51	52.25	47.75	49.38	50.62
2	nC6	nC7	19.62	80.38	22.11	77.89	20.19	79.81
3	nC6	nC7	74.30	25.70	77.07	22.93	74.98	25.02
4	nC13	nC14	49.57	50.43	51.40	48.60	49.78	50.22
5	nC14	nC6	21.41	78.59	10.58	89.42	19.08	80.92
6	nC6	nC10	46.92	53.08	59.34	40.66	49.43	50.57
7	nC6	nC10	80.32	19.68	87.08	12.92	81.87	18.13
8	nC6	CyC6	45.70	54.30	45.11	54.89	49.81	50.19
9	nC6	CyC6	16.93	83.07	16.60	83.40	19.38	80.62
10	nC6	CyC6	78.18	21.82	77.78	22.22	80.86	19.14
11	nC6	Bz	43.25	56.75	40.86	59.14	50.36	49.64
12	nC6	Bz	15.56	84.44	14.31	85.69	19.70	80.30
13	nC6	Bz	75.19	24.81	73.31	26.69	80.14	19.86
14	Bz	Tol	49.43	50.57	53.55	46.45	49.08	50.92
15	Bz	Tol	19.27	80.73	21.97	78.03	19.06	80.94
16	Bz	Tol	80.91	19.09	83.33	16.67	80.69	19.31
17	Bz	CyC6	81.01	18.99	82.13	17.87	79.07	20.93
18	Bz	CyC6	22.16	77.84	23.47	76.53	20.14	79.86
19	Bz	CyC6	56.74	43.26	58.56	41.44	53.74	46.26
20	nC15	nC7	21.19	78.81	11.26	88.74	19.93	80.07
21	nC7	MetCyC6	47.22	52.78	46.71	53.29	49.16	50.84
22	nC7	MetCyC6	64.88	35.12	64.42	35.58	66.63	33.37
23	nC7	EtBz	45.88	54.12	47.32	52.68	50.79	49.21
24	EtBz	nC6	57.39	42.61	52.23	47.77	50.65	49.35
25	EtBz	MetCyC6	53.58	46.42	51.63	48.37	50.61	49.39
26	MetCyC6	nC6	52.30	47.70	49.04	50.96	48.48	51.52
27	nC6	nC9	76.30	23.70	82.73	17.27	77.82	22.18
28	nC7	nC10	50.50	49.50	59.16	40.84	51.14	48.86
29	nC7	Bz	50.97	49.03	44.76	55.24	56.21	43.79
30	Bz	EtBz	50.06	49.94	57.67	42.33	49.71	50.29
31	Bz	MetCyC6	54.03	45.97	59.63	40.37	50.71	49.29
32	nC7	nC13	79.78	20.22	87.89	12.11	80.75	19.25
33	nC10	nC14	72.84	27.16	78.90	21.10	73.70	26.30
34	metCyC6	nC13	74.20	25.80	84.38	15.62	73.88	26.12
35	MetCyC6	nC14	74.31	25.69	85.39	14.61	74.14	25.86
36	nC7	Tol	40.19	59.81	38.19	61.81	45.00	55.00
37	nC6	Tol	49.93	50.07	51.60	48.40	56.69	43.31
38	nC13	Tol	46.69	53.31	30.45	69.55	50.09	49.91

39	metCyC6	Tol	48.79	51.21	47.20	52.80	51.77	48.23
40	Bz	nC14	76.05	23.95	88.97	11.03	73.38	26.62
41	nC13	EtBz	40.50	59.50	28.16	71.84	43.81	56.19

**Tableau 1** : compositions des mélanges binaires.

• **Les mélanges ternaires :**

N°	C1	C2	C3	m1	m2	m3	n1	n2	n3	V1	V2	V3
42	nC6	nC7	nC9	33.20	33.43	33.37	39.35	34.08	26.57	34.55	33.57	31.88
43	nC6	nC13	nC12	30.50	34.95	34.56	47.42	25.40	27.18	33.27	33.26	33.47
44	nC7	nC13	nC6	33.12	35.62	31.26	37.28	21.80	40.92	33.89	32.96	33.15
45	CyC6	BZ	nC6	32.99	36.20	30.81	32.32	38.21	29.48	32.54	31.63	35.84
46	nC13	CyC6	BZ	29.20	32.56	38.24	15.30	37.39	47.31	31.14	33.75	35.11
47	mCyC6	Tol	nC7	26.38	41.15	32.47	25.85	42.97	31.18	26.54	36.74	36.73
48	nC7	BZ	Tol	27.99	35.77	36.24	24.70	40.51	34.79	33.14	32.98	33.88
49	nC7	CyC6	mCyC6	29.97	34.09	35.94	27.94	37.85	34.20	32.61	32.61	34.78
50	nC10	CyC6	mCyC6	33.22	34.63	32.15	24.01	42.32	33.67	34.52	33.76	31.72
51	nC10	BZ	Tol	28.66	36.11	35.23	19.25	44.19	36.55	32.44	33.96	33.60
52	nC10	Tol	EtBz	29.42	35.84	34.74	22.40	42.14	35.46	33.10	33.96	32.94
53	nC12	nC13	CyC6	32.04	33.82	34.14	24.20	23.61	52.19	32.73	33.96	33.31
54	nC13	mCyC6	Tol	14.55	64.54	20.91	8.19	68.25	23.56	15.11	65.93	18.96
55	nC13	CyC6	EtBz	11.53	21.80	66.67	6.59	27.27	66.14	12.68	23.30	64.02
56	BZ	Tol	EtBz	24.59	36.97	38.44	29.20	37.22	33.59	24.33	37.09	38.58
57	BZ	Tol	nC6	31.50	25.78	42.73	34.21	23.73	42.06	27.50	22.82	49.67
58	BZ	Tol	mCyC6	27.36	22.79	49.85	31.69	22.38	45.93	25.48	21.51	53.01
59	BZ	EtBz	nC13	21.81	63.50	14.69	29.18	62.50	8.33	21.12	62.36	16.52
60	BZ	EtBz	mCyC6	23.51	57.78	18.71	29.06	52.54	18.39	22.72	56.63	20.65
61	CyC6	mCyC6	EtBz	33.32	44.81	21.87	37.42	43.12	19.46	33.90	46.12	19.98
62	CyC6	nC6	mCyC6	32.97	42.42	24.61	34.52	43.38	22.09	30.55	46.36	23.08
63	nC7	nC10	mCyC6	18.00	40.26	41.75	20.23	31.87	47.90	19.38	40.63	39.99

**Tableau 2** : compositions des mélanges ternaires.

**2.2 Mesure expérimentale :**

Les propriétés physiques mesurées sont les suivantes :

**2.2.1 La densité  $d_4^{20}$  :**

Pour mesurer cette propriété, nous avons utilisé un densimètre électronique réglé à une température de 20°C. La mesure a nécessité un volume d'environ 5 ml de produit.

**2.2.2 L'indice de réfraction  $n_D^{20}$  :**

Pour mesurer l'indice de réfraction, nous avons utilisé un réfractomètre d'ABBEE par rapport à la raie jaune du sodium. Seulement quelques gouttes d'échantillon sont nécessaires pour effectuer la mesure.

**2.2.3 La viscosité cinématique  $v^{20}$  :**

La mesure de la viscosité est basée sur la mesure du temps d'écoulement du liquide entre deux niveaux différents d'un tube capillaire. La viscosité cinématique est obtenue en multipliant chaque constante du viscosimètre par le temps d'écoulement.

#### 2.2.4 La tension superficielle $TS^{20}$ :

Pour déterminer la tension superficielle, nous avons utilisé la méthode de l'arrachement de l'anneau qui consiste à mesurer la force nécessaire pour arracher l'anneau rigide immergé dans le liquide. L'anneau est relié par l'intermédiaire d'un fil de torsion à une balance de mesure.

La lecture de la valeur de la tension superficielle de l'échantillon se fait directement sur le tensiomètre en dynes/cm.

#### 2.2.5 Le point d'aniline PA :

La méthode de mesure qu'on a utilisé consiste à introduire deux volumes de  $10\text{cm}^3$  d'aniline et de l'échantillon à analysé dans un tube. L'agitation se fait automatiquement et le mélange est ensuite chauffé jusqu'à l'apparition d'un trouble net. A ce moment, la température correspondante est affichée en °C.

### 2.3 Résultats des mesures expérimentales :

Les résultats des mesures expérimentales menées sur les produits purs et sur les mélanges binaires et ternaires sont portés dans les tableaux 3, 4 et 5 :

- Corps purs:

corps purs	$d^{20}$ (g mole/l)	$n^{20}$	$v^{20}$ (cst)	$TS^{20}$ (dynes/cm)	PA (°C)
<b>Paraffines</b>					
nC6	0.66	1.3794	0.46	20.43	63
nC7	0.6841	1.3918	0.6	23.33	68
nC9	0.7188	1.4095	0.98	24.90	73.2
nC10	0.7299	1.4156	1.22	25.42	75.4
nC11	-	-	1.59	27.61	79.2
C12	0.7434	1.4223	1.65	28.47	81.6
nC13	0.7564	1.4293	2.45	29.03	
nC14	0.7626	1.4325	3.05	29.14	88.6
nC15	0.7688	1.4358		28.36	
<b>Naphtènes</b>					
CyC6	0.7783	1.4398	1.1	27.97	30.8
MCyC6	0.7691	1.4261	1.15	25.99	39.2
<b>Aromatiques</b>					
Bz	0.8786	1.5035	0.74	31.58	-
Tol	0.8666	1.5001	0.68	32.47	-
Et Bz	0.8663	1.4985	0.77	31.23	-

Tableau 3 : résultats de mesure des propriétés des corps purs.

- Mélanges binaires :

N° <sub>mel</sub>	d <sup>20</sup> (g.mole/l)	n <sup>20</sup>	v <sup>20</sup> (cst)	TS <sup>20</sup> (dynes/cm)	PA(°C)
1	0.6721	1.3859	-	21.33	68
2	0.679	1.39	-	21.78	67.8
3	0.6656	1.3825	-	20.71	67.6
4	0.7593	1.4311	3.37	25.61	-
5	0.6804	1.3934	0.9136	20.67	70.8
6	0.6958	1.4	0.7825	21.63	71.2
7	0.6727	1.3883	1.01	21.40	68.8
8	0.7181	1.4044	0.99	24.57	47.2
9	0.7547	1.42	0.993	23.45	35.4
10	0.6819	1.3892	0.56	-	59.2
11	0.7652	1.4409	0.8499	24.39	-
12	0.8336	1.4791	0.661	27.32	-
13	0.7011	1.402	0.496	22.57	44.2
14	0.8714	1.5021	0.709	-	-
15	0.8684	1.5003	0.697	30.54	-
16	0.8751	1.5029	0.734	29.62	-
17	0.8442	1.4798	0.75	30.35	-
18	0.7942	1.442	0.98	26.36	-
19	0.8269	1.4665	0.79	27.39	-
20	0.7238	1.4102	0.86	21.94	67
21	0.7412	1.4153	0.75	23.35	49.6
22	0.7313	1.411	0.63	22.71	52.4
23	0.7871	1.4494	0.66	25.36	-
24	0.7678	1.444	0.58	23.81	-
25	0.8169	1.4619	0.81	26.09	-
26	0.7143	1.4034	0.62	21.96	52.4
27	0.6736	1.388	0.56	18.44	68.6
28	0.7208	1.41	0.87	23.63	68.2
29	0.7795	1.4418	0.53	24.79	-
30	0.8714	1.4994	0.75	30.90	-
31	0.8204	1.4621	0.73	24.38	-
32	0.7209	1.4088	0.81	20.52	64.8
33	0.7387	1.4203	1.54	25.78	80
34	0.765	1.4276	1.18	25.11	55.2
35	0.7669	1.4283	1.06	26.34	55.8
36	0.7957	1.4558	1.13	26.58	-
37	0.7503	1.4398	0.51	24.43	-
38	0.8083	1.461	1.12	30.32	31
39	0.8134	1.46	0.73	27.55	-
40	0.842	1.4802	0.89	29.40	-
41	0.816	1.466	1.1	30.17	-

**Tablea4** : Résultats de mesure des propriétés des mélanges binaires.

• Mélanges ternaires :

N° <sub>mel</sub>	d <sup>20</sup> (g mole/l)	n <sup>20</sup>	v <sup>20</sup> (cst)	TS <sup>20</sup> (dynes/cm)	PA(°C)
42	0.6878	1.3963	0.65	24.49	69.8
43	0.7209	1.4119	1.19	26.72	-
44	0.7013	1.4018	0.81	21.70	-
45	0.7636	1.4332	0.62	23.33	-
46	0.7927	1.4472	1.09	26.98	-
47	0.7715	1.439	0.65	24.21	-
48	0.8071	1.463	0.61	26.28	-
49	0.7431	1.4155	0.85	24.12	45.2
50	0.7565	1.4229	1.14	25.37	51.4
51	0.8226	1.4712	0.75	27.58	-
52	0.8186	1.4693	0.8	28.12	-
53	0.757	1.4256	1.61	26.25	-
54	0.7834	1.4392	0.95	26.22	-
55	0.8287	1.4726	0.93	28.42	-
56	0.83	1.471	0.81	28.23	-
57	0.7446	1.424	0.6	22.92	-
58	0.795	1.4442	0.82	26.23	-
59	0.8503	1.4877	0.86	29.33	-
60	0.847	1.484	0.73	29.29	-
61	0.7897	1.4412	0.93	27.29	-
62	0.721	1.4059	0.7	22.32	48
63	0.7368	1.4151	0.99	24.36	62

**Tableau 5** : Résultats de mesure des propriétés des mélanges ternaires.

Notons que les points d'aniline de certains mélanges n'ont peut être mesurés. Leurs valeurs étant inférieures à la température ambiante.

### 3 . CALCUL DES PROPRIETES PHYSIQUES

#### 3 . 1 Par les règles de mélanges classiques :

Sur les mélanges préparés, nous avons testé différentes règles de mélanges en effectuant des pondérations de types

- $P_i = \sum X_i P_i$                     moyenne arithmétique
- $P_i^{1/2} = \sum X_i P_i^{1/2}$             moyenne géométrique
- $P_i^{1/3} = \sum X_i P_i^{1/3}$             moyenne cubique.
- $\log P_i = \sum X_i \log P_i$         moyenne logarithmique.
- $P_i^{-1} = \sum X_i P_i^{-1}$         moyenne harmonique.

$P_i$  : propriété du constituant  $i$  et  $X_i$  : composition massique, molaire ou volumique du constituant  $i$ .

Les résultats obtenus sont comparés aux valeurs expérimentales

• La densité :

N° <sub>mel</sub>	d <sub>exp</sub>	d <sub>armmas</sub>	e(%)	dar <sub>mol</sub>	e(%)	dar <sub>vol</sub>	e(%)	d <sub>geom</sub>	e(%)	d <sub>geomol</sub>	e(%)	d <sub>geovol</sub>	e(%)
1	0.672	0.6724	0.05	0.6715	0.09	0.6722	0.01	0.6724	0.04	0.6715	0.10	0.6721	0.02
2	0.679	0.6794	0.05	0.6788	0.03	0.6792	0.03	0.6793	0.05	0.6787	0.04	0.6792	0.05
3	0.666	0.6662	0.09	0.6655	0.01	0.6660	0.06	0.6662	0.08	0.6655	0.02	0.6660	0.00
4	0.759	0.7595	0.03	0.7594	0.01	0.7595	0.03	0.7595	0.03	0.7594	0.01	0.7595	0.01
5	0.68	0.6820	0.23	0.6709	1.40	0.6796	0.12	0.6813	0.14	0.6705	1.45	0.6790	0.29
6	0.696	0.6971	0.19	0.6884	1.06	0.6953	0.07	0.6967	0.12	0.6880	1.12	0.6949	0.17
7	0.673	0.6738	0.16	0.6690	0.55	0.6727	0.00	0.6735	0.12	0.6688	0.57	0.6724	0.17
8	0.718	0.7242	0.85	0.7249	0.95	0.7194	0.18	0.7230	0.69	0.7237	0.78	0.7182	0.36
9	0.755	0.7583	0.47	0.7587	0.53	0.7554	0.09	0.7576	0.38	0.7580	0.44	0.7546	0.56
10	0.682	0.6858	0.57	0.6863	0.64	0.6826	0.11	0.6850	0.45	0.6854	0.52	0.6819	0.11
11	0.765	0.7841	2.46	0.7893	3.15	0.7685	0.43	0.7802	1.96	0.7855	2.66	0.7646	0.09
12	0.834	0.8446	1.32	0.8473	1.64	0.8355	0.23	0.8425	1.07	0.8454	1.42	0.8331	0.06
13	0.701	0.7142	1.87	0.7183	2.46	0.7034	0.33	0.7113	1.46	0.7153	2.02	0.7009	0.09
14	0.871	0.8725	0.13	0.8730	0.19	0.8725	0.13	0.8725	0.13	0.8730	0.19	0.8725	0.02
15	0.868	0.8689	0.06	0.8692	0.10	0.8689	0.06	0.8689	0.06	0.8692	0.10	0.8689	0.03
16	0.875	0.8763	0.14	0.8766	0.17	0.8763	0.14	0.8763	0.14	0.8766	0.17	0.8763	0.00
17	0.844	0.8596	1.82	0.8607	1.95	0.8576	1.59	0.8591	1.76	0.8602	1.90	0.8571	0.69
18	0.794	0.8005	0.80	0.8018	0.96	0.7985	0.54	0.8000	0.73	0.8013	0.89	0.7980	0.72
19	0.827	0.8352	1.01	0.8370	1.23	0.8322	0.64	0.8345	0.91	0.8363	1.14	0.8315	0.49
20	0.724	0.7237	0.01	0.7180	0.80	0.7230	0.11	0.7235	0.04	0.7179	0.81	0.7228	0.11
21	0.741	0.7419	0.10	0.7422	0.14	0.7408	0.05	0.7417	0.06	0.7420	0.10	0.7406	0.08
22	0.731	0.7318	0.07	0.7321	0.10	0.7308	0.07	0.7315	0.03	0.7318	0.07	0.7305	0.08
23	0.787	0.7953	1.04	0.7931	0.76	0.7877	0.08	0.7934	0.80	0.7912	0.52	0.7858	0.05
24	0.768	0.7784	1.38	0.7678	0.01	0.7645	0.43	0.7750	0.93	0.7643	0.46	0.7610	0.38
25	0.817	0.8212	0.52	0.8193	0.29	0.8183	0.17	0.8205	0.44	0.8186	0.20	0.8176	0.03
26	0.714	0.7171	0.39	0.7135	0.11	0.7129	0.20	0.7160	0.24	0.7125	0.26	0.7119	0.11
27	0.674	0.6736	0.00	0.6698	0.56	0.6727	0.13	0.6734	0.03	0.6696	0.59	0.6725	0.18
28	0.721	0.7207	0.02	0.7191	0.24	0.7205	0.04	0.7206	0.02	0.7190	0.24	0.7205	0.10
29	0.78	0.7935	1.79	0.8038	3.12	0.7847	0.67	0.7913	1.51	0.8017	2.84	0.7826	0.26
30	0.871	0.8725	0.12	0.8734	0.23	0.8724	0.12	0.8724	0.12	0.8734	0.23	0.8724	0.11
31	0.82	0.8283	0.96	0.8344	1.71	0.8246	0.52	0.8274	0.85	0.8335	1.60	0.8237	0.19
32	0.721	0.7207	0.03	0.7170	0.54	0.7202	0.09	0.7205	0.05	0.7170	0.55	0.7201	0.12
33	0.739	0.7388	0.01	0.7368	0.26	0.7385	0.03	0.7387	0.00	0.7367	0.27	0.7384	0.02
34	0.765	0.7658	0.11	0.7671	0.28	0.7658	0.10	0.7658	0.11	0.7671	0.28	0.7658	0.05
35	0.767	0.7674	0.07	0.7682	0.16	0.7674	0.07	0.7674	0.07	0.7681	0.16	0.7674	0.04
36	0.796	0.8043	1.08	0.8074	1.47	0.7968	0.14	0.8025	0.85	0.8056	1.25	0.7950	0.05
37	0.75	0.7635	1.75	0.7600	1.29	0.7495	0.11	0.7599	1.29	0.7565	0.83	0.7460	0.65
38	0.808	0.8151	0.85	0.8330	3.06	0.8114	0.38	0.8142	0.73	0.8323	2.96	0.8105	0.22
39	0.813	0.8190	0.69	0.8206	0.88	0.8161	0.33	0.8183	0.60	0.8199	0.79	0.8154	0.09
40	0.842	0.8508	1.05	0.8658	2.83	0.8477	0.68	0.8501	0.96	0.8654	2.78	0.8469	0.27
41	0.816	0.8218	0.71	0.8353	2.37	0.8182	0.26	0.8209	0.60	0.8346	2.28	0.8172	0.12
42	0.688	0.6877	0.02	0.6838	0.58	0.6868	0.14	0.6875	0.05	0.6836	0.61	0.6866	0.17
43	0.721	0.7225	0.22	0.7072	1.91	0.7200	0.13	0.7219	0.14	0.7064	2.01	0.7193	0.22
44	0.701	0.7023	0.15	0.6900	1.61	0.6999	0.19	0.7017	0.06	0.6895	1.68	0.6994	0.28
45	0.764	0.7782	1.91	0.7818	2.38	0.7676	0.53	0.7756	1.57	0.7792	2.04	0.7650	0.18
46	0.793	0.8103	2.22	0.8224	3.75	0.8067	1.77	0.8094	2.10	0.8215	3.64	0.8058	1.66
47	0.772	0.7816	1.31	0.7845	1.68	0.7737	0.29	0.7796	1.06	0.7825	1.43	0.7717	0.03
48	0.807	0.8198	1.58	0.8264	2.39	0.8101	0.37	0.8175	1.29	0.8242	2.12	0.8075	0.05

49	0.743	0.7468	0.49	0.7488	0.77	0.7444	0.17	0.7462	0.41	0.7483	0.70	0.7438	0.09
50	0.757	0.7593	0.37	0.7636	0.94	0.7587	0.29	0.7591	0.35	0.7635	0.92	0.7585	0.27
51	0.823	0.8318	1.11	0.8456	2.79	0.8263	0.45	0.8305	0.95	0.8446	2.67	0.8249	0.28
52	0.819	0.8263	0.94	0.8359	2.11	0.8213	0.32	0.8251	0.79	0.8349	1.99	0.8200	0.17
53	0.757	0.7597	0.36	0.7647	1.01	0.7594	0.32	0.7596	0.35	0.7646	1.01	0.7594	0.31
54	0.783	0.7876	0.54	0.7910	0.97	0.7857	0.29	0.7871	0.48	0.7905	0.90	0.7852	0.23
55	0.829	0.8344	0.69	0.8351	0.77	0.8319	0.38	0.8338	0.62	0.8345	0.70	0.8312	0.30
56	0.83	0.8694	4.75	0.8700	4.82	0.8694	4.75	0.8694	4.75	0.8700	4.82	0.8694	4.75
57	0.745	0.7821	5.04	0.7838	5.26	0.7673	3.05	0.7785	4.55	0.7802	4.77	0.7635	2.54
58	0.795	0.8213	3.31	0.8256	3.85	0.8180	2.89	0.8205	3.20	0.8248	3.75	0.8171	2.79
59	0.85	0.8528	0.30	0.8607	1.23	0.8507	0.05	0.8523	0.24	0.8604	1.19	0.8502	0.01
60	0.847	0.8510	0.47	0.8520	0.59	0.8490	0.24	0.8505	0.42	0.8515	0.53	0.8485	0.18
61	0.79	0.7934	0.47	0.7915	0.22	0.7916	0.25	0.7930	0.41	0.7910	0.17	0.7912	0.19
62	0.721	0.7259	0.67	0.7249	0.55	0.7213	0.05	0.7247	0.52	0.7238	0.39	0.7202	0.11
63	0.737	0.7380	0.17	0.7394	0.35	0.7367	0.01	0.7377	0.12	0.7390	0.30	0.7364	0.06
em			<b>0.83</b>		<b>1.25</b>		<b>0.42</b>		<b>0.72</b>		<b>1.17</b>		<b>0.35</b>

N°mcl	d <sub>exp</sub>	d <sub>cubmas</sub>	e(%)	d <sub>cubmol</sub>	e(%)	d <sub>cubvol</sub>	e(%)	d <sub>logmas</sub>	e(%)	d <sub>logmol</sub>	e(%)	d <sub>logvol</sub>	e(%)
1	0.672	0.6723	0.04	0.6714	0.10	0.6721	0.00	0.6723	0.03	0.6714	0.10	0.6721	0.00
2	0.679	0.6793	0.05	0.6787	0.04	0.6792	0.03	0.6793	0.04	0.6787	0.04	0.6792	0.02
3	0.666	0.6661	0.08	0.6655	0.02	0.6660	0.06	0.6661	0.08	0.6654	0.02	0.6659	0.05
4	0.759	0.7595	0.03	0.7594	0.01	0.7595	0.03	0.7595	0.03	0.7594	0.01	0.7595	0.03
5	0.68	0.6811	0.11	0.6704	1.47	0.6788	0.23	0.6807	0.05	0.6702	1.50	0.6784	0.29
6	0.696	0.6965	0.10	0.6879	1.14	0.6948	0.15	0.6962	0.06	0.6876	1.18	0.6945	0.19
7	0.673	0.6734	0.10	0.6688	0.58	0.6723	0.06	0.6732	0.07	0.6686	0.60	0.6722	0.08
8	0.718	0.7226	0.63	0.7233	0.73	0.7177	0.05	0.7218	0.52	0.7225	0.61	0.7169	0.16
9	0.755	0.7574	0.35	0.7578	0.41	0.7544	0.05	0.7569	0.29	0.7573	0.34	0.7538	0.12
10	0.682	0.6847	0.41	0.6852	0.48	0.6816	0.04	0.6842	0.33	0.6846	0.40	0.6812	0.11
11	0.765	0.7789	1.80	0.7842	2.49	0.7633	0.25	0.7763	1.46	0.7817	2.15	0.7607	0.59
12	0.834	0.8418	0.99	0.8447	1.34	0.8322	0.17	0.8403	0.81	0.8433	1.17	0.8305	0.38
13	0.701	0.7104	1.32	0.7143	1.88	0.7001	0.14	0.7085	1.06	0.7124	1.61	0.6986	0.36
14	0.871	0.8725	0.13	0.8730	0.19	0.8725	0.12	0.8725	0.13	0.8730	0.18	0.8725	0.12
15	0.868	0.8689	0.06	0.8692	0.10	0.8689	0.06	0.8689	0.06	0.8692	0.09	0.8689	0.05
16	0.875	0.8763	0.14	0.8766	0.17	0.8763	0.13	0.8763	0.14	0.8766	0.17	0.8763	0.13
17	0.844	0.8589	1.74	0.8601	1.88	0.8569	1.51	0.8586	1.71	0.8598	1.84	0.8566	1.47
18	0.794	0.7998	0.71	0.8011	0.87	0.7979	0.46	0.7995	0.67	0.8008	0.83	0.7975	0.42
19	0.827	0.8342	0.88	0.8361	1.11	0.8312	0.52	0.8337	0.82	0.8356	1.05	0.8307	0.46
20	0.724	0.7235	0.04	0.7179	0.82	0.7228	0.14	0.7234	0.06	0.7178	0.83	0.7227	0.16
21	0.741	0.7416	0.05	0.7419	0.09	0.7405	0.10	0.7414	0.03	0.7417	0.07	0.7403	0.12
22	0.731	0.7315	0.02	0.7317	0.06	0.7305	0.12	0.7313	0.00	0.7315	0.03	0.7303	0.14
23	0.787	0.7928	0.72	0.7906	0.44	0.7852	0.24	0.7915	0.56	0.7893	0.28	0.7839	0.40
24	0.768	0.7738	0.78	0.7631	0.61	0.7598	1.04	0.7715	0.48	0.7608	0.92	0.7575	1.34
25	0.817	0.8202	0.41	0.8183	0.17	0.8173	0.05	0.8197	0.35	0.8178	0.12	0.8169	0.01
26	0.714	0.7157	0.19	0.7121	0.31	0.7115	0.39	0.7150	0.10	0.7114	0.40	0.7108	0.49
27	0.674	0.6733	0.04	0.6696	0.60	0.6724	0.17	0.6732	0.06	0.6695	0.61	0.6723	0.19
28	0.721	0.7206	0.03	0.7190	0.24	0.7205	0.04	0.7206	0.03	0.7190	0.25	0.7205	0.04
29	0.78	0.7906	1.42	0.8009	2.75	0.7819	0.30	0.7891	1.23	0.7995	2.56	0.7804	0.12
30	0.871	0.8724	0.12	0.8734	0.23	0.8724	0.11	0.8724	0.12	0.8734	0.23	0.8724	0.11
31	0.82	0.8271	0.81	0.8332	1.56	0.8234	0.37	0.8264	0.74	0.8326	1.49	0.8228	0.29

32	0.721	0.7205	0.05	0.7169	0.55	0.7201	0.11	0.7204	0.06	0.7169	0.56	0.7200	0.12
33	0.739	0.7387	0.00	0.7367	0.27	0.7384	0.04	0.7386	0.01	0.7367	0.27	0.7384	0.05
34	0.765	0.7658	0.11	0.7671	0.28	0.7658	0.10	0.7658	0.10	0.7671	0.27	0.7658	0.10
35	0.767	0.7674	0.07	0.7681	0.16	0.7674	0.07	0.7674	0.07	0.7681	0.16	0.7674	0.07
36	0.796	0.8019	0.77	0.8050	1.17	0.7943	0.17	0.8006	0.62	0.8038	1.02	0.7931	0.33
37	0.75	0.7588	1.13	0.7553	0.67	0.7449	0.72	0.7564	0.82	0.7530	0.36	0.7426	1.02
38	0.808	0.8139	0.69	0.8320	2.93	0.8102	0.23	0.8133	0.62	0.8314	2.86	0.8095	0.15
39	0.813	0.8181	0.57	0.8196	0.76	0.8152	0.22	0.8176	0.51	0.8191	0.70	0.8147	0.16
40	0.842	0.8498	0.93	0.8653	2.76	0.8466	0.55	0.8493	0.87	0.8650	2.73	0.8461	0.49
41	0.816	0.8206	0.56	0.8343	2.25	0.8169	0.11	0.8200	0.49	0.8338	2.18	0.8163	0.04
42	0.688	0.6874	0.06	0.6836	0.61	0.6866	0.18	0.6873	0.08	0.6834	0.63	0.6864	0.20
43	0.721	0.7217	0.11	0.7062	2.04	0.7191	0.25	0.7213	0.05	0.7057	2.11	0.7187	0.31
44	0.701	0.7015	0.03	0.6894	1.70	0.6992	0.30	0.7011	0.03	0.6891	1.75	0.6988	0.36
45	0.764	0.7747	1.45	0.7783	1.92	0.7641	0.06	0.7729	1.22	0.7765	1.69	0.7623	0.17
46	0.793	0.8091	2.06	0.8212	3.60	0.8055	1.62	0.8085	1.99	0.8206	3.53	0.8050	1.55
47	0.772	0.7790	0.97	0.7819	1.34	0.7711	0.06	0.7777	0.80	0.7805	1.17	0.7697	0.23
48	0.807	0.8167	1.19	0.8235	2.03	0.8067	0.05	0.8151	0.99	0.8220	1.85	0.8049	0.27
49	0.743	0.7460	0.39	0.7481	0.67	0.7436	0.06	0.7456	0.34	0.7477	0.62	0.7432	0.01
50	0.757	0.7591	0.34	0.7634	0.91	0.7585	0.26	0.7590	0.33	0.7633	0.90	0.7584	0.25
51	0.823	0.8300	0.90	0.8442	2.63	0.8245	0.23	0.8291	0.79	0.8435	2.55	0.8235	0.11
52	0.819	0.8247	0.74	0.8345	1.94	0.8195	0.11	0.8238	0.64	0.8338	1.86	0.8186	0.00
53	0.757	0.7596	0.35	0.7646	1.00	0.7593	0.31	0.7596	0.34	0.7645	1.00	0.7593	0.30
54	0.783	0.7870	0.45	0.7903	0.88	0.7850	0.21	0.7866	0.41	0.7900	0.84	0.7847	0.17
55	0.829	0.8336	0.59	0.8343	0.67	0.8310	0.28	0.8332	0.54	0.8339	0.62	0.8305	0.22
56	0.83	0.8694	4.75	0.8700	4.82	0.8694	4.75	0.8694	4.75	0.8700	4.82	0.8694	4.75
57	0.745	0.7772	4.38	0.7789	4.61	0.7623	2.38	0.7748	4.05	0.7764	4.28	0.7598	2.04
58	0.795	0.8202	3.17	0.8245	3.71	0.8169	2.75	0.8196	3.10	0.8240	3.64	0.8163	2.68
59	0.85	0.8522	0.22	0.8603	1.18	0.8500	0.04	0.8518	0.18	0.8601	1.15	0.8496	0.08
60	0.847	0.8504	0.40	0.8514	0.51	0.8483	0.16	0.8500	0.36	0.8510	0.47	0.8480	0.12
61	0.79	0.7928	0.39	0.7909	0.15	0.7911	0.17	0.7925	0.36	0.7906	0.12	0.7908	0.14
62	0.721	0.7244	0.47	0.7234	0.34	0.7198	0.16	0.7236	0.36	0.7227	0.23	0.7190	0.27
63	0.737	0.7376	0.11	0.7389	0.29	0.7363	0.07	0.7374	0.08	0.7387	0.25	0.7360	0.10
em			0.68		1.15		0.38		0.60		1.09		0.40

N°mcl	d <sub>exp</sub>	d <sub>har,mas</sub>	e(%)	d <sub>har,mol</sub>	e(%)	d <sub>har,vol</sub>	e(%)
1	0.6721	0.6722	0.01	0.6713	0.12	0.6720	0.02
2	0.679	0.6792	0.03	0.6786	0.06	0.6791	0.01
3	0.6656	0.6660	0.06	0.6654	0.03	0.6659	0.04
4	0.7593	0.7595	0.03	0.7594	0.01	0.7595	0.03
5	0.6804	0.6796	0.12	0.6695	1.60	0.6774	0.44
6	0.6958	0.6953	0.07	0.6867	1.30	0.6936	0.32
7	0.6727	0.6727	0.00	0.6683	0.66	0.6717	0.15
8	0.7181	0.7194	0.18	0.7201	0.27	0.7145	0.50
9	0.7547	0.7554	0.09	0.7558	0.15	0.7522	0.33
10	0.6819	0.6826	0.11	0.6831	0.17	0.6798	0.31
11	0.7652	0.7685	0.43	0.7739	1.13	0.7530	1.59
12	0.8336	0.8355	0.23	0.8388	0.63	0.8248	1.06
13	0.7011	0.7034	0.33	0.7069	0.83	0.6943	0.97
14	0.8714	0.8725	0.13	0.8730	0.18	0.8724	0.12

15	0.8684	0.8689	0.06	0.8692	0.09	0.8689	0.05
16	0.8751	0.8763	0.14	0.8766	0.17	0.8763	0.13
17	0.8442	0.8576	1.59	0.8588	1.73	0.8555	1.34
18	0.7942	0.7985	0.54	0.7997	0.70	0.7966	0.30
19	0.8269	0.8322	0.64	0.8341	0.87	0.8292	0.27
20	0.7238	0.7230	0.11	0.7176	0.86	0.7223	0.21
21	0.7412	0.7408	0.05	0.7411	0.01	0.7397	0.20
22	0.7313	0.7308	0.07	0.7310	0.03	0.7298	0.20
23	0.7871	0.7877	0.08	0.7855	0.20	0.7802	0.88
24	0.7678	0.7645	0.43	0.7538	1.83	0.7505	2.25
25	0.8169	0.8183	0.17	0.8164	0.06	0.8154	0.18
26	0.7143	0.7129	0.20	0.7093	0.69	0.7087	0.78
27	0.6736	0.6727	0.13	0.6691	0.67	0.6719	0.26
28	0.7208	0.7205	0.04	0.7190	0.26	0.7204	0.05
29	0.7795	0.7847	0.67	0.7951	2.00	0.7762	0.42
30	0.8714	0.8724	0.12	0.8734	0.22	0.8724	0.11
31	0.8204	0.8246	0.52	0.8308	1.27	0.8210	0.07
32	0.7209	0.7202	0.09	0.7167	0.58	0.7198	0.15
33	0.7387	0.7385	0.03	0.7366	0.29	0.7382	0.06
34	0.765	0.7658	0.10	0.7671	0.27	0.7657	0.10
35	0.7669	0.7674	0.07	0.7681	0.16	0.7674	0.07
36	0.7957	0.7968	0.14	0.8001	0.55	0.7892	0.81
37	0.7503	0.7495	0.11	0.7461	0.56	0.7360	1.91
38	0.8083	0.8114	0.38	0.8298	2.66	0.8077	0.08
39	0.8134	0.8161	0.33	0.8177	0.53	0.8132	0.02
40	0.842	0.8477	0.68	0.8641	2.62	0.8444	0.29
41	0.816	0.8182	0.26	0.8322	1.99	0.8145	0.19
42	0.6878	0.6953	1.09	0.6830	0.69	0.6860	0.26
43	0.7209	0.7519	4.29	0.7043	2.31	0.7173	0.49
44	0.7013	0.7234	3.15	0.6882	1.87	0.6976	0.52
45	0.7636	0.7972	4.41	0.7712	0.99	0.7570	0.86
46	0.7927	0.8138	2.67	0.8189	3.31	0.8033	1.33
47	0.7715	0.7975	3.37	0.7766	0.66	0.7658	0.74
48	0.8071	0.8742	8.32	0.8173	1.26	0.7995	0.94
49	0.7431	0.7750	4.29	0.7465	0.46	0.7419	0.16
50	0.7565	0.7753	2.49	0.7631	0.87	0.7581	0.21
51	0.8226	0.8743	6.29	0.8413	2.28	0.8206	0.25
52	0.8186	0.8665	5.85	0.8316	1.59	0.8159	0.33
53	0.757	0.7637	0.89	0.7644	0.98	0.7592	0.29
54	0.7834	0.7876	0.54	0.7889	0.71	0.7838	0.05
55	0.8287	0.8348	0.74	0.8327	0.48	0.8292	0.06
56	0.83	0.8665	4.40	0.8700	4.82	0.8694	4.74
57	0.7446	0.7644	2.65	0.7689	3.27	0.7524	1.05
58	0.795	0.8151	2.53	0.8223	3.43	0.8147	2.48
59	0.8503	0.8482	0.25	0.8594	1.07	0.8484	0.22
60	0.847	0.8463	0.08	0.8500	0.35	0.8469	0.01
61	0.7897	0.7884	0.16	0.7898	0.02	0.7900	0.04
62	0.721	0.6839	5.15	0.7204	0.09	0.7168	0.59
63	0.7368	0.7458	1.22	0.7379	0.15	0.7353	0.20
em			1.18		0.96		0.53

Dans le tableau qui suit nous résumons les différents écarts moyens obtenus en comparant les densités expérimentales et celles calculées par les différentes règles de mélanges.

ompositions mélanges	massique (%)			molaire (%)			volumique (%)		
	bin	ter	som	bin	ter	som	bin	ter	som
$\epsilon_{moy}$ (%) arithmétique	<b>0.61</b>	<b>1.23</b>	0.83	<b>0.93</b>	<b>1.84</b>	1.25	<b>0.23</b>	<b>0.77</b>	0.42
$\epsilon_{moy}$ (%) géométrique	<b>0.50</b>	<b>1.11</b>	0.72	<b>0.87</b>	<b>1.74</b>	1.17	<b>0.21</b>	<b>0.68</b>	0.35
$\epsilon_{moy}$ (%) cubique	<b>0.47</b>	<b>1.07</b>	0.68	<b>0.85</b>	<b>1.71</b>	1.15	<b>0.23</b>	<b>0.66</b>	0.38
$\epsilon_{moy}$ (%) logarithmique	<b>0.40</b>	<b>0.99</b>	0.60	<b>0.80</b>	<b>1.64</b>	1.09	<b>0.27</b>	<b>0.65</b>	0.40
$\epsilon_{moy}$ (%) harmonique	<b>0.23</b>	<b>2.95</b>	1.18	<b>0.71</b>	<b>1.44</b>	0.96	<b>0.42</b>	<b>0.72</b>	0.53

Tableau 6: Comparaison entre les densités calculées et celles mesurées.

La comparaison des densités calculées à partir des règles de mélanges et celles mesurées expérimentalement, montre que les écarts obtenus sont faibles et ceci quelque soit le type de la moyenne utilisée, nous remarquons tout de même que les plus faibles écarts ont été enregistrés dans le cas où la composition est prise en pourcentages volumiques pour les différentes moyennes (arithmétique, géométrique, cubique logarithmique et harmonique). On remarque aussi que pour ces compositions volumiques, la moyenne géométrique donne le plus faible écart.

• **L'indice de réfraction :**

N°mel	$n_{exp}$	$n_{armmas}$	e(%)	$n_{armmol}$	e(%)	$n_{armvol}$	e(%)	$n_{geomas}$	e(%)	$n_{geomol}$	e(%)	$n_{geovol}$	e(%)
1	1.3859	1.3858	0.01	1.3853	0.04	1.3857	0.02	1.3858	0.01	1.3853	0.04	1.3857	0.01
2	1.39	1.3894	0.05	1.3891	0.07	1.3893	0.05	1.3894	0.05	1.3891	0.07	1.3893	0.03
3	1.3825	1.3826	0.01	1.3822	0.02	1.3825	0.00	1.3826	0.01	1.3822	0.02	1.3825	0.06
4	1.4311	1.4309	0.01	1.4309	0.02	1.4309	0.01	1.4309	0.01	1.4309	0.02	1.4309	0.03
5	1.3934	1.3908	0.19	1.3850	0.60	1.3895	0.28	1.3907	0.19	1.3850	0.60	1.3895	0.21
6	1.4	1.3986	0.10	1.3941	0.42	1.3977	0.16	1.3986	0.10	1.3941	0.42	1.3976	0.13
7	1.3883	1.3865	0.13	1.3841	0.30	1.3860	0.17	1.3865	0.13	1.3841	0.31	1.3859	0.04
8	1.4044	1.4122	0.56	1.4126	0.58	1.4097	0.38	1.4120	0.54	1.4124	0.57	1.4096	0.01
9	1.42	1.4296	0.67	1.4298	0.69	1.4281	0.57	1.4295	0.67	1.4297	0.68	1.4280	0.01
10	1.3892	1.3926	0.24	1.3928	0.26	1.3910	0.13	1.3925	0.24	1.3927	0.25	1.3909	0.00
11	1.4409	1.4498	0.62	1.4528	0.83	1.4410	0.01	1.4492	0.57	1.4522	0.78	1.4403	0.08
12	1.4791	1.4842	0.34	1.4857	0.45	1.4791	0.00	1.4838	0.32	1.4854	0.43	1.4786	0.06
13	1.402	1.4102	0.58	1.4125	0.75	1.4040	0.15	1.4097	0.55	1.4120	0.71	1.4036	0.02
14	1.5021	1.5018	0.02	1.5019	0.01	1.5018	0.02	1.5018	0.02	1.5019	0.01	1.5018	0.12
15	1.5003	1.5008	0.03	1.5008	0.04	1.5007	0.03	1.5008	0.03	1.5008	0.04	1.5007	0.06
16	1.5029	1.5029	0.00	1.5029	0.00	1.5028	0.00	1.5029	0.00	1.5029	0.00	1.5028	0.13
17	1.4798	1.4914	0.78	1.4921	0.83	1.4902	0.70	1.4913	0.78	1.4920	0.83	1.4901	1.53
18	1.442	1.4539	0.83	1.4548	0.88	1.4526	0.74	1.4538	0.82	1.4546	0.88	1.4525	0.48
19	1.4665	1.4759	0.64	1.4771	0.72	1.4740	0.51	1.4758	0.63	1.4769	0.71	1.4739	0.55
20	1.4102	1.4091	0.08	1.4057	0.32	1.4087	0.11	1.4091	0.08	1.4057	0.32	1.4086	0.13
21	1.4153	1.4147	0.04	1.4148	0.04	1.4142	0.08	1.4146	0.05	1.4148	0.04	1.4142	0.09
22	1.411	1.4104	0.04	1.4105	0.03	1.4100	0.07	1.4104	0.04	1.4105	0.04	1.4100	0.10
23	1.4494	1.4542	0.33	1.4528	0.23	1.4494	0.00	1.4538	0.30	1.4524	0.21	1.4490	0.16

24	1.444	1.4478	0.26	1.4416	0.17	1.4397	0.30	1.4472	0.22	1.4410	0.21	1.4391	0.89
25	1.4619	1.4649	0.20	1.4635	0.11	1.4627	0.06	1.4647	0.19	1.4633	0.09	1.4625	0.08
26	1.4034	1.4038	0.03	1.4023	0.08	1.4020	0.10	1.4037	0.02	1.4022	0.09	1.4019	0.34
27	1.388	1.3861	0.14	1.3841	0.28	1.3856	0.17	1.3860	0.14	1.3841	0.28	1.3856	0.16
28	1.41	1.4087	0.09	1.4075	0.18	1.4086	0.10	1.4087	0.09	1.4075	0.18	1.4086	0.04
29	1.4418	1.4517	0.69	1.4580	1.13	1.4464	0.32	1.4513	0.66	1.4576	1.09	1.4460	0.39
30	1.4994	1.5010	0.11	1.5014	0.13	1.5010	0.11	1.5010	0.11	1.5014	0.13	1.5010	0.12
31	1.4621	1.4679	0.40	1.4723	0.69	1.4653	0.22	1.4677	0.38	1.4720	0.68	1.4651	0.40
32	1.4088	1.4074	0.10	1.4052	0.25	1.4072	0.12	1.4074	0.10	1.4052	0.26	1.4072	0.11
33	1.4203	1.4202	0.01	1.4192	0.08	1.4200	0.02	1.4202	0.01	1.4192	0.08	1.4200	0.04
34	1.4276	1.4269	0.05	1.4266	0.07	1.4269	0.05	1.4269	0.05	1.4266	0.07	1.4269	0.10
35	1.4283	1.4277	0.04	1.4270	0.09	1.4278	0.04	1.4277	0.04	1.4270	0.09	1.4278	0.07
36	1.4558	1.4606	0.33	1.4626	0.47	1.4559	0.01	1.4602	0.30	1.4622	0.44	1.4555	0.09
37	1.4398	1.4398	0.00	1.4378	0.14	1.4317	0.56	1.4392	0.04	1.4372	0.18	1.4310	0.57
38	1.461	1.4670	0.41	1.4785	1.20	1.4646	0.25	1.4668	0.40	1.4784	1.19	1.4644	0.27
39	1.46	1.4640	0.27	1.4652	0.35	1.4618	0.12	1.4638	0.26	1.4649	0.34	1.4616	0.25
40	1.4802	1.4865	0.43	1.4957	1.04	1.4846	0.30	1.4863	0.41	1.4956	1.04	1.4844	0.58
41	1.466	1.4705	0.30	1.4790	0.89	1.4682	0.15	1.4703	0.29	1.4788	0.88	1.4680	0.15
42	1.3963	1.3936	0.19	1.3916	0.33	1.3932	0.22	1.3936	0.20	1.3916	0.34	1.3931	0.23
43	1.4119	1.4117	0.02	1.4037	0.58	1.4104	0.11	1.4116	0.02	1.4036	0.59	1.4103	0.12
44	1.4018	1.4013	0.04	1.3949	0.49	1.4001	0.12	1.4012	0.04	1.3948	0.50	1.4000	0.13
45	1.4332	1.4442	0.77	1.4463	0.92	1.4383	0.36	1.4438	0.74	1.4459	0.89	1.4379	0.32
46	1.4472	1.4611	0.96	1.4683	1.46	1.4589	0.81	1.4609	0.95	1.4681	1.45	1.4587	0.80
47	1.439	1.4454	0.45	1.4472	0.57	1.4407	0.12	1.4450	0.42	1.4468	0.54	1.4403	0.09
48	1.463	1.4710	0.55	1.4747	0.80	1.4653	0.16	1.4706	0.52	1.4743	0.77	1.4649	0.13
49	1.4155	1.4205	0.35	1.4217	0.44	1.4194	0.27	1.4204	0.35	1.4216	0.43	1.4193	0.27
50	1.4229	1.4274	0.31	1.4294	0.46	1.4271	0.30	1.4273	0.31	1.4294	0.45	1.4271	0.29
51	1.4712	1.4771	0.40	1.4853	0.96	1.4738	0.18	1.4769	0.38	1.4851	0.95	1.4736	0.16
52	1.4693	1.4747	0.37	1.4806	0.77	1.4716	0.16	1.4744	0.35	1.4804	0.76	1.4713	0.14
53	1.4256	1.4306	0.35	1.4331	0.53	1.4305	0.34	1.4306	0.35	1.4331	0.52	1.4305	0.34
54	1.4392	1.4420	0.20	1.4438	0.32	1.4406	0.10	1.4419	0.19	1.4436	0.31	1.4405	0.09
55	1.4726	1.4777	0.35	1.4779	0.36	1.4760	0.23	1.4776	0.34	1.4778	0.35	1.4759	0.22
56	1.471	1.5003	1.99	1.5006	2.01	1.5003	1.99	1.5003	1.99	1.5006	2.01	1.5003	1.99
57	1.424	1.4496	1.80	1.4505	1.86	1.4411	1.20	1.4490	1.75	1.4499	1.82	1.4404	1.15
58	1.4442	1.4641	1.38	1.4672	1.59	1.4617	1.21	1.4639	1.36	1.4669	1.57	1.4615	1.20
59	1.4877	1.4894	0.12	1.4942	0.44	1.4881	0.03	1.4893	0.11	1.4941	0.43	1.4880	0.02
60	1.484	1.4861	0.14	1.4866	0.18	1.4847	0.05	1.4860	0.13	1.4865	0.17	1.4845	0.04
61	1.4412	1.4465	0.37	1.4453	0.29	1.4452	0.28	1.4464	0.36	1.4452	0.28	1.4451	0.27
62	1.4059	1.4108	0.35	1.4106	0.33	1.4086	0.19	1.4107	0.34	1.4104	0.32	1.4085	0.18
63	1.4151	1.4157	0.04	1.4158	0.05	1.4152	0.01	1.4157	0.04	1.4158	0.05	1.4152	0.00
em			0.34		0.50		0.25		0.34		0.49		0.27

N°mel	n <sub>exp</sub>	n <sub>cubmas</sub>	e(%)	n <sub>cubmol</sub>	e(%)	n <sub>cubvol</sub>	e(%)	n <sub>logmas</sub>	e(%)	n <sub>logmol</sub>	e(%)	n <sub>logvol</sub>	e(%)
1	1.3859	1.3853	0.04	1.3853	0.04	1.3857	0.02	1.3858	0.01	1.3853	0.04	1.3857	0.02
2	1.39	1.3891	0.07	1.3891	0.07	1.3893	0.05	1.3894	0.05	1.3890	0.07	1.3893	0.05
3	1.3825	1.3822	0.02	1.3822	0.02	1.3825	0.00	1.3826	0.01	1.3822	0.02	1.3825	0.00
4	1.4311	1.4309	0.02	1.4309	0.02	1.4309	0.01	1.4309	0.01	1.4309	0.02	1.4309	0.01
5	1.3934	1.3850	0.61	1.3850	0.61	1.3894	0.29	1.3906	0.20	1.3849	0.61	1.3894	0.29
6	1.4	1.3940	0.43	1.3940	0.43	1.3976	0.17	1.3985	0.11	1.3940	0.43	1.3976	0.17

7	1.3883	1.3840	0.31	1.3840	0.31	1.3859	0.17	1.3864	0.13	1.3840	0.31	1.3859	0.17
8	1.4044	1.4123	0.57	1.4123	0.57	1.4095	0.36	1.4119	0.53	1.4122	0.56	1.4094	0.36
9	1.42	1.4297	0.68	1.4297	0.68	1.4280	0.56	1.4294	0.66	1.4296	0.68	1.4279	0.56
10	1.3892	1.3927	0.25	1.3927	0.25	1.3908	0.12	1.3924	0.23	1.3926	0.24	1.3908	0.11
11	1.4409	1.4519	0.77	1.4519	0.77	1.4401	0.05	1.4485	0.53	1.4515	0.74	1.4397	0.09
12	1.4791	1.4853	0.42	1.4853	0.42	1.4785	0.04	1.4835	0.30	1.4851	0.40	1.4782	0.06
13	1.402	1.4118	0.70	1.4118	0.70	1.4035	0.11	1.4092	0.51	1.4115	0.68	1.4032	0.09
14	1.5021	1.5019	0.01	1.5019	0.01	1.5018	0.02	1.5018	0.02	1.5019	0.01	1.5018	0.02
15	1.5003	1.5008	0.04	1.5008	0.04	1.5007	0.03	1.5008	0.03	1.5008	0.04	1.5007	0.03
16	1.5029	1.5029	0.00	1.5029	0.00	1.5028	0.00	1.5029	0.00	1.5029	0.00	1.5028	0.00
17	1.4798	1.4920	0.82	1.4920	0.82	1.4900	0.69	1.4912	0.77	1.4919	0.82	1.4899	0.69
18	1.442	1.4546	0.87	1.4546	0.87	1.4525	0.73	1.4537	0.81	1.4545	0.87	1.4524	0.72
19	1.4665	1.4769	0.71	1.4769	0.71	1.4738	0.50	1.4756	0.62	1.4768	0.70	1.4737	0.49
20	1.4102	1.4057	0.32	1.4057	0.32	1.4086	0.11	1.4090	0.08	1.4057	0.32	1.4086	0.11
21	1.4153	1.4148	0.04	1.4148	0.04	1.4142	0.08	1.4146	0.05	1.4147	0.04	1.4142	0.08
22	1.411	1.4105	0.04	1.4105	0.04	1.4099	0.07	1.4104	0.05	1.4105	0.04	1.4099	0.08
23	1.4494	1.4523	0.20	1.4523	0.20	1.4489	0.03	1.4534	0.27	1.4520	0.18	1.4486	0.05
24	1.444	1.4408	0.22	1.4408	0.22	1.4389	0.35	1.4465	0.18	1.4404	0.25	1.4385	0.38
25	1.4619	1.4632	0.09	1.4632	0.09	1.4624	0.04	1.4644	0.17	1.4630	0.08	1.4623	0.03
26	1.4034	1.4022	0.09	1.4022	0.09	1.4019	0.11	1.4036	0.02	1.4021	0.09	1.4018	0.11
27	1.388	1.3841	0.28	1.3841	0.28	1.3856	0.17	1.3860	0.14	1.3841	0.28	1.3856	0.18
28	1.41	1.4075	0.18	1.4075	0.18	1.4086	0.10	1.4087	0.09	1.4075	0.18	1.4086	0.10
29	1.4418	1.4574	1.08	1.4574	1.08	1.4458	0.28	1.4508	0.63	1.4571	1.06	1.4455	0.26
30	1.4994	1.5014	0.13	1.5014	0.13	1.5010	0.11	1.5010	0.11	1.5014	0.13	1.5010	0.11
31	1.4621	1.4719	0.67	1.4719	0.67	1.4650	0.20	1.4674	0.36	1.4718	0.66	1.4648	0.19
32	1.4088	1.4052	0.26	1.4052	0.26	1.4071	0.12	1.4074	0.10	1.4052	0.26	1.4071	0.12
33	1.4203	1.4192	0.08	1.4192	0.08	1.4200	0.02	1.4202	0.01	1.4191	0.08	1.4200	0.02
34	1.4276	1.4266	0.07	1.4266	0.07	1.4269	0.05	1.4269	0.05	1.4266	0.07	1.4269	0.05
35	1.4283	1.4270	0.09	1.4270	0.09	1.4278	0.04	1.4277	0.04	1.4270	0.09	1.4278	0.04
36	1.4558	1.4621	0.43	1.4621	0.43	1.4554	0.03	1.4598	0.28	1.4618	0.41	1.4551	0.05
37	1.4398	1.4370	0.20	1.4370	0.20	1.4308	0.62	1.4386	0.09	1.4366	0.23	1.4304	0.65
38	1.461	1.4783	1.18	1.4783	1.18	1.4644	0.23	1.4666	0.38	1.4782	1.18	1.4642	0.22
39	1.46	1.4649	0.33	1.4649	0.33	1.4615	0.10	1.4635	0.24	1.4647	0.32	1.4613	0.09
40	1.4802	1.4956	1.04	1.4956	1.04	1.4844	0.28	1.4862	0.40	1.4955	1.03	1.4843	0.27
41	1.466	1.4788	0.87	1.4788	0.87	1.4679	0.13	1.4701	0.28	1.4787	0.86	1.4678	0.12
42	1.3963	1.3936	0.20	1.3916	0.34	1.3931	0.23	1.3935	0.20	1.3916	0.34	1.3931	0.23
43	1.4119	1.4116	0.02	1.4036	0.59	1.4102	0.12	1.4115	0.03	1.4035	0.59	1.4102	0.12
44	1.4018	1.4012	0.04	1.3948	0.50	1.3999	0.13	1.4011	0.05	1.3948	0.50	1.3999	0.14
45	1.4332	1.4437	0.73	1.4457	0.87	1.4377	0.31	1.4434	0.71	1.4454	0.85	1.4374	0.29
46	1.4472	1.4608	0.94	1.4681	1.44	1.4586	0.79	1.4607	0.93	1.4679	1.43	1.4585	0.78
47	1.439	1.4449	0.41	1.4467	0.53	1.4402	0.08	1.4446	0.39	1.4464	0.52	1.4399	0.06
48	1.463	1.4704	0.51	1.4742	0.77	1.4647	0.12	1.4702	0.49	1.4739	0.75	1.4644	0.10
49	1.4155	1.4204	0.35	1.4216	0.43	1.4193	0.27	1.4204	0.34	1.4216	0.43	1.4192	0.26
50	1.4229	1.4273	0.31	1.4294	0.45	1.4271	0.29	1.4273	0.31	1.4293	0.45	1.4271	0.29
51	1.4712	1.4768	0.38	1.4851	0.94	1.4735	0.15	1.4766	0.37	1.4849	0.93	1.4733	0.14
52	1.4693	1.4744	0.34	1.4803	0.75	1.4712	0.13	1.4742	0.33	1.4802	0.74	1.4711	0.12
53	1.4256	1.4306	0.35	1.4331	0.52	1.4305	0.34	1.4306	0.35	1.4331	0.52	1.4305	0.34
54	1.4392	1.4418	0.18	1.4436	0.30	1.4404	0.08	1.4417	0.18	1.4435	0.30	1.4403	0.08
55	1.4726	1.4775	0.33	1.4777	0.35	1.4758	0.22	1.4774	0.33	1.4776	0.34	1.4757	0.21
56	1.471	1.5003	1.99	1.5006	2.01	1.5003	1.99	1.5003	1.99	1.5006	2.01	1.5003	1.99
57	1.424	1.4487	1.74	1.4496	1.80	1.4402	1.14	1.4483	1.71	1.4492	1.77	1.4398	1.11
58	1.4442	1.4638	1.36	1.4669	1.57	1.4614	1.19	1.4637	1.35	1.4667	1.56	1.4612	1.18

59	1.4877	1.4893	0.11	1.4941	0.43	1.4880	0.02	1.4892	0.10	1.4941	0.43	1.4879	0.01
60	1.484	1.4859	0.13	1.4864	0.16	1.4845	0.03	1.4858	0.12	1.4864	0.16	1.4844	0.03
61	1.4412	1.4463	0.36	1.4452	0.27	1.4450	0.27	1.4462	0.35	1.4451	0.27	1.4450	0.26
62	1.4059	1.4106	0.34	1.4104	0.32	1.4085	0.18	1.4105	0.33	1.4103	0.31	1.4084	0.18
63	1.4151	1.4157	0.04	1.4158	0.05	1.4151	0.00	1.4156	0.04	1.4158	0.05	1.4151	0.00
em			0.42		0.49		0.24		0.33		0.48		0.24

N°mel	n <sup>20</sup> <sub>exp</sub>	n <sub>har</sub> mas	e(%)	n <sub>har</sub> mol	e(%)	n <sub>har</sub> vol	e(%)
1	1.3859	1.3858	0.01	1.3853	0.04	1.3856	0.02
2	1.39	1.3893	0.05	1.3890	0.07	1.3893	0.05
3	1.3825	1.3826	0.00	1.3822	0.02	1.3825	0.00
4	1.4311	1.4309	0.01	1.4309	0.02	1.4309	0.01
5	1.3934	1.3904	0.21	1.3848	0.61	1.3892	0.30
6	1.4	1.3984	0.12	1.3939	0.44	1.3975	0.18
7	1.3883	1.3864	0.14	1.3840	0.31	1.3858	0.18
8	1.4044	1.4116	0.51	1.4119	0.53	1.4091	0.33
9	1.42	1.4292	0.65	1.4294	0.66	1.4277	0.54
10	1.3892	1.3921	0.21	1.3924	0.23	1.3906	0.10
11	1.4409	1.4472	0.44	1.4502	0.65	1.4383	0.18
12	1.4791	1.4827	0.25	1.4844	0.36	1.4773	0.12
13	1.402	1.4082	0.44	1.4105	0.60	1.4024	0.03
14	1.5021	1.5018	0.02	1.5019	0.01	1.5018	0.02
15	1.5003	1.5008	0.03	1.5008	0.04	1.5007	0.03
16	1.5029	1.5028	0.00	1.5029	0.00	1.5028	0.00
17	1.4798	1.4910	0.76	1.4917	0.80	1.4897	0.67
18	1.442	1.4534	0.79	1.4543	0.85	1.4522	0.71
19	1.4665	1.4753	0.60	1.4764	0.68	1.4733	0.47
20	1.4102	1.4090	0.09	1.4056	0.32	1.4085	0.12
21	1.4153	1.4146	0.05	1.4147	0.04	1.4141	0.08
22	1.411	1.4103	0.05	1.4104	0.04	1.4099	0.08
23	1.4494	1.4526	0.22	1.4512	0.12	1.4478	0.11
24	1.444	1.4453	0.09	1.4391	0.34	1.4373	0.47
25	1.4619	1.4640	0.14	1.4626	0.05	1.4618	0.00
26	1.4034	1.4034	0.00	1.4019	0.11	1.4017	0.12
27	1.388	1.3860	0.15	1.3840	0.29	1.3855	0.18
28	1.41	1.4086	0.10	1.4075	0.18	1.4086	0.10
29	1.4418	1.4499	0.56	1.4563	1.00	1.4447	0.20
30	1.4994	1.5010	0.11	1.5014	0.13	1.5010	0.11
31	1.4621	1.4669	0.33	1.4713	0.63	1.4643	0.15
32	1.4088	1.4074	0.10	1.4052	0.26	1.4071	0.12
33	1.4203	1.4202	0.01	1.4191	0.08	1.4200	0.02
34	1.4276	1.4269	0.05	1.4266	0.07	1.4269	0.05
35	1.4283	1.4277	0.04	1.4270	0.09	1.4277	0.04
36	1.4558	1.4590	0.22	1.4610	0.36	1.4543	0.11
37	1.4398	1.4373	0.17	1.4353	0.31	1.4292	0.74
38	1.461	1.4662	0.36	1.4778	1.15	1.4638	0.19
39	1.46	1.4631	0.21	1.4642	0.29	1.4609	0.06
40	1.4802	1.4859	0.38	1.4953	1.02	1.4839	0.25
41	1.466	1.4697	0.25	1.4783	0.84	1.4674	0.09
42	1.3963	1.3935	0.20	1.3915	0.34	1.3931	0.23

43	1.4119	1.4113	0.04	1.4033	0.61	1.4100	0.13
44	1.4018	1.4010	0.06	1.3946	0.51	1.3997	0.15
45	1.4332	1.4425	0.65	1.4445	0.79	1.4365	0.23
46	1.4472	1.4603	0.91	1.4676	1.41	1.4582	0.76
47	1.439	1.4439	0.34	1.4456	0.46	1.4392	0.01
48	1.463	1.4693	0.43	1.4731	0.69	1.4635	0.03
49	1.4155	1.4202	0.33	1.4214	0.42	1.4191	0.25
50	1.4229	1.4273	0.31	1.4293	0.45	1.4270	0.29
51	1.4712	1.4761	0.33	1.4845	0.91	1.4727	0.10
52	1.4693	1.4737	0.30	1.4798	0.71	1.4705	0.08
53	1.4256	1.4306	0.35	1.4330	0.52	1.4305	0.34
54	1.4392	1.4414	0.16	1.4431	0.27	1.4401	0.06
55	1.4726	1.4771	0.31	1.4774	0.32	1.4754	0.19
56	1.471	1.5003	1.99	1.5006	2.01	1.5003	1.99
57	1.424	1.4470	1.62	1.4479	1.68	1.4385	1.02
58	1.4442	1.4632	1.31	1.4662	1.52	1.4608	1.15
59	1.4877	1.4890	0.09	1.4939	0.42	1.4876	0.00
60	1.484	1.4856	0.10	1.4861	0.14	1.4841	0.00
61	1.4412	1.4460	0.33	1.4448	0.25	1.4447	0.24
62	1.4059	1.4103	0.31	1.4100	0.29	1.4081	0.16
63	1.4151	1.4156	0.03	1.4157	0.04	1.4151	0.00
em			<b>0.31</b>		<b>0.47</b>		<b>0.23</b>

Un résumé des écarts moyens obtenus entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales est donné dans le tableau 7 :

composition	mass (%)			mol (%)			vol (%)		
	bin	ter	som	bin	ter	som	bin	ter	som
$e_{\text{moy}}$ (%) arithmétique	0.25	0.52	<b>0.34</b>	0.38	0.71	<b>0.50</b>	0.17	0.38	0.25
$e_{\text{moy}}$ (%) géométrique	0.24	0.51	<b>0.34</b>	0.37	0.70	<b>0.49</b>	0.18	0.37	0.27
$e_{\text{moy}}$ (%) cubique	0.37	0.51	<b>0.42</b>	0.37	0.70	<b>0.49</b>	0.18	0.37	0.24
$e_{\text{moy}}$ (%) logarithmique	0.23	0.50	<b>0.33</b>	0.37	0.69	<b>0.48</b>	0.18	0.36	0.24
$e_{\text{moy}}$ (%) harmonique	0.22	0.48	<b>0.30</b>	0.36	0.67	<b>0.47</b>	0.18	0.34	0.23

**Tableau 7** : Comparaison entre les indices de réfraction calculées et ceux mesurés.

De la même manière que pour la densité, les écarts enregistrés entre les valeurs des indices de réfraction calculés et celles mesurées expérimentalement, sont tous faibles.

Une meilleure estimation de cette propriété est tout de même obtenue en pondérant les indices en pourcentages volumiques. Pour ce cas, les moyennes cubique, logarithmique et harmoniques ont donné les plus faibles écarts.

• La viscosité :

N°mel	v <sub>exp(cst)</sub>	v <sub>arm,mas</sub>	e(%)	v <sub>arm,mol</sub>	e(%)	v <sub>arm,vol</sub>	e(%)	v <sub>log,mas</sub>	e(%)	v <sub>log,mol</sub>	e(%)	v <sub>log,vol</sub>	e(%)
4	3.37	2.75	18.32	2.74	18.65	2.75	18.36	2.74	18.56	2.73	18.89	2.74	18.60
5	0.91	1.02	11.91	0.74	18.67	0.96	5.33	0.83	8.82	0.64	30.33	0.79	13.69
6	0.78	0.87	10.94	0.77	0.96	0.85	8.53	0.82	5.35	0.73	6.38	0.81	2.92
7	1.01	0.62	38.85	0.57	43.87	0.61	40.00	0.59	41.60	0.55	45.83	0.58	42.58
8	0.99	0.81	17.97	0.82	17.60	0.79	20.59	0.78	21.28	0.78	20.90	0.75	23.92
9	0.99	0.99	0.03	1.00	0.24	0.98	1.52	0.97	1.83	0.98	1.59	0.96	3.59
10	0.56	0.61	8.47	0.61	8.93	0.59	5.46	0.58	4.45	0.59	4.86	0.57	1.81
11	0.85	0.62	26.67	0.63	25.91	0.60	28.93	0.62	27.55	0.62	26.78	0.60	29.83
12	0.66	0.70	5.60	0.70	6.11	0.69	3.90	0.69	4.99	0.70	5.54	0.68	3.17
13	0.50	0.54	8.26	0.54	9.29	0.52	5.57	0.53	7.12	0.54	8.08	0.52	4.59
14	0.71	0.71	0.09	0.71	0.44	0.71	0.06	0.71	0.05	0.71	0.40	0.71	0.02
15	0.70	0.69	0.78	0.69	0.55	0.69	0.80	0.69	0.81	0.69	0.58	0.69	0.83
16	0.73	0.73	0.74	0.73	0.55	0.73	0.76	0.73	0.77	0.73	0.57	0.73	0.79
17	0.75	0.81	7.78	0.80	7.24	0.82	8.71	0.80	7.05	0.80	6.55	0.81	7.93
18	0.98	1.02	4.10	1.02	3.62	1.03	4.85	1.01	3.48	1.01	2.97	1.02	4.26
19	0.79	0.90	13.38	0.89	12.55	0.91	14.75	0.89	12.28	0.88	11.46	0.90	13.63
20 *	0.86	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	0.75	0.91	21.22	0.91	21.57	0.90	19.91	0.89	18.76	0.89	19.11	0.88	17.43
22	0.63	0.82	30.01	0.82	30.39	0.81	28.60	0.80	27.33	0.80	27.69	0.79	25.98
23	0.66	0.71	7.63	0.71	7.35	0.70	6.66	0.71	7.40	0.71	7.12	0.70	6.44
24	0.58	0.64	10.72	0.63	8.05	0.62	7.23	0.63	9.17	0.62	6.47	0.61	5.64
25	0.81	0.95	16.84	0.95	17.75	0.96	18.23	0.94	15.67	0.94	16.58	0.95	17.06
26	0.62	0.83	33.17	0.80	29.60	0.80	28.98	0.79	27.15	0.77	23.56	0.76	22.95
27	0.56	0.59	5.51	0.56	0.34	0.58	4.13	0.57	2.52	0.54	2.71	0.57	1.28
28	0.87	0.93	6.56	0.88	0.79	0.92	6.14	0.90	3.90	0.85	1.79	0.90	3.48
29	0.53	0.69	30.01	0.70	31.18	0.68	29.02	0.69	29.83	0.69	31.01	0.68	28.85
30	0.75	0.75	0.66	0.75	0.36	0.76	0.68	0.75	0.65	0.75	0.35	0.76	0.67
31	0.73	0.93	27.19	0.91	24.04	0.94	29.05	0.92	25.66	0.89	22.56	0.93	27.51
32	0.81	1.01	24.19	0.86	6.06	0.99	22.03	0.91	12.53	0.80	1.63	0.90	10.79
33	1.54	1.72	11.49	1.61	4.29	1.70	10.47	1.64	6.20	1.54	0.16	1.62	5.29
34	1.18	1.49	25.88	1.35	14.67	1.49	26.23	1.44	21.94	1.32	11.96	1.44	22.26
35	1.06	1.64	54.54	1.43	34.68	1.64	54.83	1.55	46.36	1.37	29.33	1.55	46.62
36	1.13	0.66	41.25	0.66	41.17	0.66	41.42	0.66	41.26	0.66	41.19	0.66	41.43
37	0.51	0.58	12.78	0.57	12.09	0.56	9.99	0.57	11.83	0.57	11.14	0.56	9.06
38	1.12	1.51	34.51	1.22	8.83	1.57	39.87	1.37	22.32	1.10	1.54	1.43	27.63
39	0.73	0.91	24.56	0.90	23.54	0.92	26.48	0.89	22.46	0.89	21.44	0.91	24.38
40	0.89	1.29	45.31	0.99	11.78	1.35	52.25	1.15	29.24	0.92	3.12	1.20	35.01
41	1.10	1.45	31.86	1.24	13.01	1.51	36.91	1.34	21.50	1.15	4.31	1.39	26.33
42	0.65	0.68	5.18	0.65	0.03	0.68	4.04	0.67	2.66	0.63	2.33	0.66	1.56
43	1.19	1.57	31.91	1.29	8.71	1.52	28.03	1.44	21.00	1.15	3.46	1.39	16.74
44	0.81	1.22	50.42	0.95	17.29	1.17	44.04	1.06	30.57	0.83	2.35	1.01	24.87
45	0.62	0.78	25.09	0.78	25.28	0.76	22.64	0.75	21.69	0.76	21.99	0.74	19.01
46	1.09	1.36	24.45	1.14	4.25	1.39	27.89	1.27	16.62	1.08	1.03	1.31	19.94
47	0.65	0.78	19.69	0.78	19.47	0.78	19.28	0.76	17.45	0.76	17.27	0.76	16.98
48	0.61	0.68	11.32	0.68	12.22	0.67	10.37	0.68	11.13	0.68	12.04	0.67	10.17
49	0.85	0.97	13.90	0.98	14.99	0.95	12.28	0.95	11.86	0.96	13.04	0.94	10.15
50	1.14	1.16	1.40	1.15	0.50	1.16	1.52	1.16	1.35	1.15	0.45	1.16	1.47
51	0.75	0.86	14.19	0.81	8.06	0.88	16.74	0.84	12.29	0.80	6.62	0.86	14.71

52	0.80	0.87	8.77	0.83	4.11	0.89	11.05	0.86	7.03	0.82	2.62	0.87	9.21
53	1.61	1.73	7.63	1.55	3.62	1.74	7.98	1.69	4.81	1.51	6.37	1.69	5.19
54	0.95	1.24	30.62	1.15	20.61	1.26	32.36	1.19	25.59	1.11	17.03	1.21	27.35
55	0.93	1.04	11.37	0.97	4.38	1.06	13.98	0.99	6.27	0.94	1.08	1.01	8.53
56	0.81	0.73	9.96	0.73	10.15	0.73	9.96	0.73	10.02	0.73	10.22	0.73	10.03
57	0.60	0.61	1.53	0.61	2.03	0.59	1.30	0.60	0.47	0.61	0.96	0.59	2.38
58	0.82	0.93	13.50	0.91	11.57	0.94	15.18	0.92	11.89	0.90	9.99	0.93	13.57
59	0.86	1.01	17.48	0.90	4.78	1.04	21.08	0.95	10.49	0.86	0.51	0.98	13.39
60	0.73	0.83	14.25	0.83	13.86	0.84	15.29	0.83	13.41	0.83	13.02	0.84	14.39
61	0.93	1.05	12.93	1.06	13.69	1.06	13.67	1.04	12.29	1.05	13.11	1.05	13.07
62	0.70	0.85	20.72	0.84	19.68	0.82	17.07	0.81	15.85	0.80	14.80	0.78	12.10
63	0.99	1.08	9.01	1.06	7.17	1.07	8.27	1.06	7.52	1.05	5.58	1.06	6.69
em			17.37		12.60		17.31		14.27		11.06		14.40

Nº mel	v <sub>exp/cst</sub>	v <sub>cub/mas</sub>	e(%)	v <sub>cub/mo</sub>	e(%)	v <sub>cub/vol</sub>	e(%)	v <sub>log/mas</sub>	e(%)	v <sub>log/mol</sub>	e(%)	v <sub>log/vol</sub>	e(%)
4	3.37	2.74	18.65	2.73	18.97	2.74	18.68	2.97	11.87	2.73	19.13	2.73	18.84
5	0.91	0.78	14.34	0.61	33.09	0.74	18.64	0.91	0.91	0.57	37.30	0.67	26.50
6	0.78	0.81	3.45	0.72	8.13	0.79	1.04	0.76	2.43	0.69	11.48	0.76	2.70
7	1.01	0.58	42.41	0.54	46.38	0.57	43.33	0.59	41.51	0.53	47.36	0.56	44.68
8	0.99	0.77	22.41	0.77	22.02	0.74	25.04	0.71	28.47	0.75	24.29	0.72	27.25
9	0.99	0.97	2.54	0.97	2.29	0.95	4.37	0.88	11.38	0.96	3.81	0.93	6.05
10	0.56	0.58	3.25	0.58	3.63	0.56	0.73	0.55	1.04	0.57	1.39	0.55	1.24
11	0.85	0.61	27.85	0.62	27.07	0.59	30.13	0.72	15.12	0.61	27.67	0.59	30.72
12	0.66	0.69	4.77	0.70	5.34	0.68	2.92	0.89	34.52	0.69	4.91	0.68	2.38
13	0.50	0.53	6.75	0.53	7.70	0.52	4.28	0.57	14.28	0.53	6.96	0.51	3.70
14	0.71	0.71	0.03	0.71	0.38	0.71	0.00	0.86	21.54	0.71	0.35	0.71	0.03
15	0.70	0.69	0.82	0.69	0.59	0.69	0.84	0.94	35.38	0.69	0.61	0.69	0.85
16	0.73	0.73	0.78	0.73	0.58	0.73	0.80	0.78	6.78	0.73	0.59	0.73	0.82
17	0.75	0.80	6.82	0.80	6.33	0.81	7.68	0.78	4.47	0.79	5.91	0.80	7.20
18	0.98	1.01	3.26	1.01	2.74	1.02	4.06	0.94	4.55	1.00	2.27	1.02	3.63
19	0.79	0.88	11.91	0.88	11.10	0.89	13.26	0.84	6.70	0.87	10.39	0.89	12.52
20 *	0.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	0.75	0.88	17.93	0.89	18.28	0.87	16.60	0.81	8.00	0.87	16.61	0.86	14.95
22	0.63	0.80	26.47	0.80	26.82	0.79	25.14	0.75	18.82	0.79	25.14	0.78	23.53
23	0.66	0.71	7.33	0.71	7.04	0.70	6.36	0.81	23.46	0.71	6.89	0.70	6.21
24	0.58	0.63	8.64	0.61	5.93	0.61	5.11	0.86	48.40	0.61	4.87	0.60	4.05
25	0.81	0.93	15.28	0.94	16.19	0.95	16.67	0.87	7.32	0.93	15.41	0.94	15.89
26	0.62	0.78	25.11	0.75	21.55	0.75	20.94	1.08	73.52	0.73	17.57	0.73	16.98
27	0.56	0.57	1.61	0.54	3.42	0.56	0.40	0.56	0.38	0.53	4.72	0.55	1.21
28	0.87	0.90	3.01	0.85	2.63	0.89	2.59	0.80	8.25	0.83	4.26	0.88	0.82
29	0.53	0.69	29.78	0.69	30.95	0.68	28.79	0.80	50.29	0.69	30.84	0.68	28.68
30	0.75	0.75	0.65	0.75	0.35	0.75	0.67	0.86	14.68	0.75	0.34	0.75	0.66
31	0.73	0.91	25.15	0.89	22.07	0.93	27.00	0.85	16.42	0.88	21.11	0.92	25.97
32	0.81	0.88	9.26	0.78	3.66	0.87	7.66	0.70	13.53	0.75	7.05	0.83	2.31
33	1.54	1.61	4.59	1.52	1.48	1.60	3.71	1.16	24.94	1.48	3.88	1.55	0.81
34	1.18	1.42	20.73	1.31	11.15	1.43	21.04	1.11	5.99	1.29	9.68	1.40	18.74
35	1.06	1.53	43.89	1.35	27.81	1.53	44.14	1.11	4.66	1.33	25.11	1.48	39.61
36	1.13	0.66	41.26	0.66	41.19	0.66	41.43	0.84	26.03	0.66	41.20	0.66	41.44
37	0.51	0.57	11.51	0.57	10.83	0.55	8.75	0.69	34.50	0.56	10.20	0.55	8.14

38	1.12	1.32	18.27	1.07	4.67	1.38	23.48	1.52	35.67	1.00	10.30	1.29	15.37
39	0.73	0.89	21.76	0.88	20.75	0.90	23.68	1.07	46.65	0.87	19.37	0.89	22.27
40	0.89	1.11	24.65	0.90	0.88	1.16	29.99	0.80	10.64	0.87	2.79	1.08	21.22
41	1.10	1.30	18.17	1.12	1.70	1.35	22.87	1.44	30.69	1.07	3.02	1.28	16.23
42	0.65	0.66	1.85	0.63	3.06	0.65	0.76	0.65	0.26	0.62	4.47	0.64	0.79
43	1.19	1.39	16.98	1.10	7.56	1.34	12.63	1.29	8.54	1.01	15.49	1.24	4.14
44	0.81	1.01	24.42	0.80	1.83	0.96	19.04	0.92	13.29	0.74	8.91	0.88	8.62
45	0.62	0.75	20.55	0.75	20.89	0.73	17.80	0.73	18.27	0.74	18.68	0.72	15.40
46	1.09	1.24	14.17	1.06	2.60	1.28	17.43	1.19	9.56	1.03	5.43	1.23	12.67
47	0.65	0.76	16.74	0.76	16.57	0.76	16.25	0.75	15.38	0.75	15.25	0.75	14.86
48	0.61	0.68	11.07	0.68	11.97	0.67	10.11	0.68	10.94	0.68	11.85	0.67	9.97
49	0.85	0.94	11.14	0.96	12.36	0.93	9.40	0.93	9.65	0.94	10.92	0.92	7.86
50	1.14	1.16	1.34	1.15	0.44	1.16	1.45	1.15	1.30	1.14	0.41	1.16	1.42
51	0.75	0.84	11.68	0.80	6.18	0.86	14.05	0.83	10.52	0.79	5.33	0.85	12.79
52	0.80	0.85	6.48	0.82	2.15	0.87	8.61	0.84	5.40	0.81	1.26	0.86	7.45
53	1.61	1.67	3.87	1.49	7.25	1.68	4.25	1.64	2.00	1.47	8.95	1.65	2.40
54	0.95	1.18	24.03	1.10	15.91	1.20	25.79	1.15	21.08	1.08	13.80	1.17	22.85
55	0.93	0.97	4.83	0.93	0.14	0.99	6.97	0.95	2.27	0.92	1.51	0.97	4.20
56	0.81	0.73	10.05	0.73	10.24	0.73	10.05	0.73	10.09	0.73	10.28	0.73	10.09
57	0.60	0.60	0.12	0.60	0.60	0.58	2.73	0.60	0.60	0.60	0.13	0.58	3.44
58	0.82	0.91	11.35	0.90	9.47	0.93	13.03	0.90	10.28	0.89	8.43	0.92	11.95
59	0.86	0.93	8.55	0.85	0.63	0.96	11.24	0.90	5.22	0.84	2.54	0.92	7.50
60	0.73	0.83	13.15	0.82	12.76	0.83	14.11	0.82	12.64	0.82	12.25	0.83	13.56
61	0.93	1.04	12.07	1.05	12.91	1.05	12.86	1.04	11.61	1.05	12.48	1.05	12.42
62	0.70	0.80	14.17	0.79	13.12	0.77	10.41	0.78	10.76	0.77	9.74	0.75	7.04
63	0.99	1.06	6.98	1.04	5.00	1.05	6.11	1.05	5.81	1.03	3.77	1.04	4.89
em			13.40		11.01		13.52		15.92		11.30		12.04

N°mel	v <sub>exp/c</sub>	v <sub>har</sub> mas	e(%)	v <sub>har</sub> mol	e(%)	v <sub>har</sub> vol	e(%)
4	3.37	2.72	19.29	2.71	19.62	2.72	19.33
5	0.91	0.57	37.18	0.52	43.50	0.56	38.65
6	0.78	0.70	10.84	0.63	19.92	0.68	12.84
7	1.01	0.53	47.06	0.51	49.45	0.53	47.63
8	0.99	0.68	31.10	0.69	30.76	0.66	33.37
9	0.99	0.90	9.71	0.90	9.39	0.87	12.06
10	0.56	0.54	4.09	0.54	3.83	0.53	5.74
11	0.85	0.59	30.26	0.60	29.48	0.57	32.47
12	0.66	0.68	2.77	0.68	3.45	0.66	0.57
13	0.50	0.52	4.19	0.52	4.98	0.51	2.16
14	0.71	0.71	0.09	0.71	0.26	0.71	0.12
15	0.70	0.69	0.89	0.69	0.67	0.69	0.91
16	0.73	0.73	0.85	0.73	0.64	0.73	0.87
17	0.75	0.79	5.21	0.79	4.80	0.79	5.92
18	0.98	0.99	1.32	0.99	0.74	1.00	2.23
19	0.79	0.86	9.12	0.86	8.37	0.87	10.38
20 *	0.86	-	-	-	-	-	-
21	0.75	0.84	11.41	0.84	11.74	0.83	10.17
22	0.63	0.76	20.33	0.76	20.62	0.75	19.23
23	0.66	0.70	6.72	0.70	6.44	0.70	5.76

24	0.58	0.61	4.37	0.59	1.74	0.59	0.96
25	0.81	0.91	12.28	0.92	13.14	0.92	13.60
26	0.62	0.68	9.75	0.66	6.77	0.66	6.27
27	0.56	0.54	4.26	0.52	7.78	0.53	5.12
28	0.87	0.84	3.80	0.79	8.71	0.83	4.18
29	0.53	0.69	29.32	0.69	30.50	0.68	28.35
30	0.75	0.75	0.62	0.75	0.32	0.75	0.64
31	0.73	0.89	21.24	0.86	18.41	0.90	22.98
32	0.81	0.75	7.11	0.70	13.23	0.75	7.89
33	1.54	1.46	5.36	1.40	9.30	1.45	5.94
34	1.18	1.33	12.92	1.25	6.27	1.34	13.14
35	1.06	1.37	29.16	1.27	19.35	1.37	29.32
36	1.13	0.66	41.30	0.66	41.23	0.66	41.47
37	0.51	0.56	9.02	0.55	8.35	0.54	6.38
38	1.12	1.03	8.38	0.87	22.16	1.07	4.86
39	0.73	0.85	16.35	0.84	15.42	0.86	18.15
40	0.89	0.90	1.57	0.81	9.27	0.93	4.15
41	1.10	1.07	3.08	0.95	13.25	1.10	0.06
42	0.65	0.62	4.09	0.60	8.22	0.62	5.03
43	1.19	1.00	16.05	0.78	34.21	0.96	19.70
44	0.81	0.73	9.39	0.63	21.91	0.71	12.11
45	0.62	0.69	11.65	0.70	12.22	0.67	8.56
46	1.09	1.07	1.56	0.96	11.93	1.10	0.99
47	0.65	0.73	11.83	0.73	11.78	0.72	11.23
48	0.61	0.67	10.56	0.68	11.46	0.67	9.56
49	0.85	0.89	4.86	0.90	6.25	0.88	2.98
50	1.14	1.15	1.21	1.14	0.33	1.16	1.33
51	0.75	0.81	7.44	0.77	3.15	0.82	9.39
52	0.80	0.82	2.51	0.79	1.09	0.83	4.30
53	1.61	1.56	3.34	1.39	13.43	1.56	2.92
54	0.95	1.08	13.42	1.03	8.14	1.09	15.20
55	0.93	0.90	3.22	0.88	5.16	0.91	1.80
56	0.81	0.73	10.23	0.73	10.41	0.73	10.23
57	0.60	0.58	2.75	0.59	2.32	0.57	5.53
58	0.82	0.88	7.13	0.86	5.43	0.89	8.73
59	0.86	0.85	1.40	0.81	6.22	0.86	0.01
60	0.73	0.81	11.30	0.81	10.91	0.82	12.10
61	0.93	1.02	10.11	1.03	11.10	1.03	11.00
62	0.70	0.71	0.87	0.70	0.03	0.68	2.48
63	0.99	1.01	1.73	0.99	0.48	1.00	0.63
em			10.49		12.03		10.67

\* : pour ce mélange, la mesure n'a pu être réalisée par manque de produit.

Les résultats obtenus précédemment sont regroupés dans le tableau suivant :

composition	mass (%)			mol (%)			vol (%)		
	bin	ter	som	bin	ter	som	bin	ter	som
<b>Mélange</b> $e_{moy}$ (%) <b>arithmétique</b>	18.54	16.01	<b>17.37</b>	14.47	10.20	<b>12.60</b>	18.44	16.02	17.31
$e_{moy}$ (%) <b>géométrique</b>	16.27	12.23	<b>14.27</b>	13.61	7.92	<b>11.06</b>	16.46	12.23	14.40
$e_{moy}$ (%) <b>cubique</b>	14.59	11.04	<b>13.40</b>	13.77	7.90	<b>11.01</b>	16.13	11.02	13.52
$e_{moy}$ (%) <b>logarithmique</b>	13.50	8.79	<b>15.92</b>	13.10	8.34	<b>11.30</b>	13.97	8.85	12.04
$e_{moy}$ (%) <b>harmonique</b>	12.85	6.79	<b>10.49</b>	13.97	9.12	<b>12.03</b>	12.91	7.28	10.67

**Tableau 8** : Comparaison entre les viscosités calculées et celles mesurées.

Les résultats du **tableau 8**, confirment la non additivité de cette propriété. En effet, des écarts de l'ordre de 10 et 18% sont considérés comme élevés.

En comparant entre les différents types de moyennes, nous remarquons que la moyenne de type harmonique a donnée relativement les plus faibles écarts notamment dans le cas des compositions massiques et volumiques, et pour les mélanges ternaires.

- **La tension superficielle :**

N°mcl	TS <sub>exp</sub>	TS <sub>ar,mas</sub>	e(%)	TS <sub>ar,mol</sub>	e(%)	TS <sub>ar,vol</sub>	e(%)	TS <sub>ge,mas</sub>	e(%)	TS <sub>ge,mol</sub>	e(%)	TS <sub>ge,vol</sub>	e(%)
1	21.33	21.93	2.78	21.82	2.27	21.90	2.66	21.90	2.67	21.79	2.16	21.88	2.55
2	21.78	22.76	4.51	22.69	4.18	22.75	4.44	22.75	4.44	22.67	4.11	22.73	4.36
3	20.71	21.18	2.27	21.10	1.88	21.16	2.17	21.16	2.18	21.08	1.80	21.14	2.09
4	25.61	29.09	13.59	29.08	13.58	29.09	13.59	29.09	13.59	29.08	13.58	29.09	13.59
5	20.67	22.30	7.88	21.35	3.31	22.09	6.90	22.17	7.25	21.28	2.96	21.98	6.32
6	21.63	23.08	6.69	22.46	3.83	22.95	6.11	23.01	6.38	22.39	3.52	22.89	5.80
7	21.40	21.41	0.04	21.08	1.53	21.34	0.32	21.37	0.16	21.05	1.67	21.30	0.51
8	24.57	24.53	0.18	24.57	0.00	24.22	1.44	24.38	0.78	24.43	0.59	24.07	2.04
9	23.45	26.70	13.86	26.72	13.97	26.51	13.07	26.61	13.50	26.64	13.62	26.42	12.68
11	24.39	26.76	9.68	27.02	10.78	25.96	6.43	26.46	8.47	26.73	9.58	25.66	5.20
12	27.32	29.84	9.24	29.98	9.75	29.38	7.56	29.68	8.66	29.83	9.21	29.19	6.86
13	22.57	23.20	2.80	23.41	3.72	22.65	0.35	22.97	1.80	23.17	2.68	22.45	0.50
15	30.54	32.30	5.76	32.27	5.68	32.30	5.77	32.29	5.76	32.27	5.68	32.30	5.76
16	29.62	31.75	7.17	31.72	7.10	31.75	7.18	31.74	7.17	31.72	7.09	31.75	7.17
17	30.35	30.89	1.77	30.93	1.90	30.82	1.54	30.87	1.71	30.92	1.85	30.80	1.48
18	26.36	28.77	9.15	28.82	9.33	28.70	8.87	28.75	9.08	28.80	9.25	28.68	8.81
19	27.39	30.02	9.61	30.08	9.85	29.91	9.21	29.99	9.51	30.06	9.75	29.88	9.11
20	21.94	24.17	10.15	23.64	7.74	24.10	9.85	24.12	9.94	23.61	7.62	24.06	9.65
21	23.35	24.60	5.34	24.62	5.40	24.54	5.09	24.58	5.24	24.59	5.31	24.52	5.00
22	22.71	24.08	6.03	24.09	6.09	24.03	5.81	24.06	5.94	24.07	6.00	24.01	5.72
23	<b>25.36</b>	<b>27.47</b>	<b>8.32</b>	<b>27.35</b>	<b>7.86</b>	<b>27.07</b>	<b>6.74</b>	<b>27.32</b>	<b>7.72</b>	<b>27.20</b>	<b>7.25</b>	<b>26.92</b>	<b>6.13</b>
24	23.81	26.61	11.74	26.05	9.39	25.88	8.66	26.33	10.55	25.76	8.18	25.59	7.46

25	26.09	28.80	10.38	28.70	9.99	28.64	9.79	28.74	10.15	28.64	9.76	28.58	9.56
26	21.96	23.32	6.21	23.14	5.37	23.10	5.23	23.23	5.82	23.05	4.99	23.02	4.84
27	18.44	21.45	16.31	21.16	14.74	21.38	15.94	21.41	16.09	21.13	14.56	21.35	15.73
28	23.63	24.22	2.47	24.01	1.60	24.20	2.41	24.20	2.41	24.00	1.54	24.19	2.34
29	24.79	27.23	9.82	27.76	11.96	26.78	8.02	27.06	9.15	27.59	11.29	26.61	7.35
30	30.90	31.40	1.61	31.43	1.70	31.40	1.61	31.40	1.61	31.43	1.70	31.40	1.61
31	24.38	29.01	18.99	29.32	20.27	28.82	18.23	28.94	18.71	29.26	20.01	28.76	17.95
32	20.52	24.25	18.20	23.77	15.83	24.20	17.92	24.20	17.93	23.73	15.66	24.14	17.66
33	25.78	26.43	2.52	26.20	1.64	26.40	2.40	26.40	2.42	26.18	1.56	26.37	2.30
34	25.11	26.78	6.62	26.47	5.39	26.79	6.66	26.76	6.56	26.46	5.35	26.77	6.60
35	26.34	26.80	1.75	26.45	0.42	26.81	1.77	26.79	1.68	26.44	0.38	26.79	1.70
36	26.58	28.68	7.89	28.87	8.60	28.23	6.18	28.49	7.16	28.68	7.88	28.03	5.43
37	24.43	26.43	8.20	26.23	7.38	25.62	4.85	26.08	6.77	25.88	5.94	25.27	3.45
38	30.32	30.86	1.77	31.42	3.61	30.75	1.39	30.84	1.69	31.40	3.55	30.72	1.31
39	27.55	29.31	6.37	29.41	6.74	29.12	5.67	29.22	6.04	29.32	6.42	29.03	5.34
40	29.40	30.99	5.40	31.31	6.47	30.93	5.18	30.98	5.37	31.30	6.46	30.92	5.15
41	30.17	30.34	0.57	30.61	1.47	30.26	0.33	30.33	0.53	30.60	1.44	30.25	0.29
42	24.49	22.89	6.53	22.61	7.69	22.83	6.79	22.85	6.69	22.57	7.85	22.79	6.94
43	26.72	25.42	4.87	24.22	9.35	25.22	5.60	25.30	5.32	24.08	9.87	25.10	6.06
44	21.70	23.64	8.95	22.89	5.48	23.50	8.27	23.57	8.62	22.83	5.19	23.43	7.95
45	23.33	26.95	15.54	27.13	16.29	26.41	13.21	26.75	14.65	26.92	15.40	26.19	12.28
46	26.98	29.66	9.92	29.84	10.59	29.57	9.58	29.64	9.84	29.82	10.50	29.55	9.50
47	24.21	27.79	14.78	27.95	15.41	27.39	13.14	27.65	14.18	27.80	14.81	27.25	12.54
48	26.28	29.59	12.58	29.85	13.56	29.15	10.88	29.45	12.05	29.72	13.07	28.99	10.30
49	24.12	25.87	7.24	26.00	7.77	25.77	6.83	25.84	7.10	25.97	7.63	25.74	6.68
50	25.37	26.49	4.41	26.69	5.22	26.46	4.31	26.48	4.36	26.68	5.17	26.45	4.26
51	27.58	30.12	9.22	30.72	11.36	29.88	8.32	30.05	8.93	30.66	11.14	29.79	8.01
52	28.12	29.96	6.56	30.45	8.28	29.73	5.71	29.89	6.28	30.38	8.05	29.64	5.42
53	26.25	27.72	5.58	27.80	5.91	27.72	5.58	27.71	5.56	27.80	5.89	27.72	5.57
54	26.22	27.79	5.99	27.77	5.91	27.68	5.57	27.73	5.76	27.70	5.66	27.62	5.36
55	28.42	30.27	6.48	30.20	6.23	30.19	6.22	30.25	6.42	30.18	6.17	30.17	6.16
56	28.23	31.77	12.54	31.79	12.61	31.77	12.54	31.77	12.53	31.79	12.60	31.77	12.54
57	22.92	27.04	17.99	27.10	18.23	26.24	14.50	26.73	16.61	26.79	16.87	25.92	13.09
58	26.23	29.00	10.55	29.21	11.37	28.81	9.83	28.92	10.25	29.13	11.08	28.73	9.54
59	29.33	30.65	4.49	30.96	5.55	30.56	4.20	30.62	4.41	30.94	5.50	30.54	4.12
60	29.29	30.33	3.56	30.37	3.68	30.23	3.20	30.29	3.43	30.33	3.55	30.19	3.06
61	27.29	27.80	1.87	27.75	1.71	27.71	1.55	27.76	1.74	27.72	1.59	27.68	1.43
62	22.32	24.29	8.80	24.26	8.70	24.02	7.60	24.17	8.26	24.14	8.15	23.90	7.06
63	24.36	25.28	3.80	25.27	3.75	25.24	3.64	25.27	3.76	25.26	3.71	25.23	3.60
em			7.47		7.49		6.79		7.20		7.24		6.54

Nºmel	TS <sub>exp</sub>	TS <sub>cubmas</sub>	e(%)	TS <sub>cubmol</sub>	e(%)	TS <sub>cubvol</sub>	e(%)	TS <sub>logmas</sub>	e(%)	TS <sub>logmol</sub>	e(%)	TS <sub>logvol</sub>	e(%)
1	21.33	21.89	2.63	21.78	2.12	21.87	2.51	21.88	2.56	21.77	2.05	21.85	2.44
2	21.78	22.74	4.42	22.67	4.08	22.72	4.34	22.73	4.37	22.66	4.03	22.71	4.29
3	20.71	21.15	2.15	21.07	1.77	21.13	2.06	21.14	2.09	21.06	1.72	21.12	2.00
4	25.61	29.09	13.59	29.08	13.58	29.09	13.59	29.09	13.59	29.08	13.58	29.09	13.59
5	20.67	22.13	7.05	21.26	2.85	21.94	6.14	22.05	6.66	21.22	2.64	21.87	5.78
6	21.63	22.99	6.27	22.37	3.42	22.86	5.69	22.94	6.06	22.33	3.23	22.82	5.48
7	21.40	21.36	0.22	21.04	1.72	21.28	0.57	21.33	0.35	21.02	1.81	21.26	0.69

8	24.57	24.33	0.98	24.38	0.79	24.02	2.24	24.23	1.38	24.28	1.20	23.92	2.64
9	23.45	26.58	13.38	26.61	13.49	26.39	12.54	26.52	13.12	26.55	13.24	26.32	12.26
11	24.39	26.36	8.06	26.63	9.17	25.56	4.78	26.16	7.23	26.43	8.35	25.36	3.96
12	27.32	29.63	8.46	29.78	9.02	29.12	6.61	29.51	8.02	29.67	8.61	28.98	6.09
13	22.57	22.90	1.48	23.09	2.34	22.39	0.77	22.76	0.87	22.95	1.70	22.28	1.28
15	30.54	32.29	5.76	32.27	5.68	32.30	5.76	32.29	5.75	32.27	5.67	32.30	5.76
16	29.62	31.74	7.16	31.72	7.09	31.75	7.17	31.74	7.16	31.72	7.09	31.75	7.17
17	30.35	30.87	1.69	30.91	1.83	30.80	1.46	30.86	1.65	30.90	1.79	30.78	1.42
18	26.36	28.75	9.05	28.79	9.23	28.68	8.79	28.73	9.01	28.78	9.18	28.66	8.74
19	27.39	29.98	9.48	30.05	9.72	29.87	9.08	29.96	9.41	30.03	9.65	29.85	9.02
20	21.94	24.11	9.87	23.61	7.58	24.05	9.58	24.08	9.74	23.59	7.50	24.02	9.45
21	23.35	24.57	5.21	24.59	5.28	24.51	4.97	24.56	5.15	24.57	5.21	24.50	4.90
22	22.71	24.05	5.92	24.07	5.98	24.00	5.69	24.04	5.86	24.05	5.92	23.99	5.63
23	25.36	27.27	7.51	27.15	7.05	26.86	5.93	27.16	7.10	27.04	6.64	26.76	5.52
24	23.81	26.23	10.15	25.66	7.77	25.49	7.05	26.04	9.35	25.47	6.96	25.30	6.24
25	26.09	28.72	10.08	28.62	9.68	28.56	9.48	28.68	9.92	28.58	9.53	28.52	9.33
26	21.96	23.20	5.69	23.02	4.86	22.99	4.71	23.15	5.43	22.97	4.60	22.93	4.46
27	18.44	21.40	16.02	21.12	14.51	21.33	15.66	21.37	15.88	21.10	14.40	21.31	15.52
28	23.63	24.20	2.39	23.99	1.52	24.18	2.32	24.19	2.35	23.98	1.48	24.17	2.28
29	24.79	27.00	8.92	27.53	11.07	26.56	7.13	26.89	8.47	27.42	10.61	26.45	6.70
30	30.90	31.40	1.61	31.43	1.70	31.40	1.61	31.40	1.61	31.43	1.70	31.40	1.61
31	24.38	28.92	18.62	29.23	19.92	28.73	17.86	28.87	18.44	29.19	19.73	28.69	17.67
32	20.52	24.18	17.84	23.72	15.60	24.12	17.57	24.14	17.67	23.70	15.49	24.09	17.41
33	25.78	26.40	2.39	26.17	1.53	26.36	2.27	26.38	2.33	26.16	1.48	26.35	2.21
34	25.11	26.76	6.54	26.45	5.33	26.76	6.57	26.74	6.49	26.45	5.30	26.75	6.53
35	26.34	26.78	1.66	26.44	0.37	26.79	1.68	26.77	1.62	26.43	0.34	26.77	1.64
36	26.58	28.42	6.91	28.61	7.64	27.96	5.18	28.29	6.41	28.48	7.15	27.83	4.67
37	24.43	25.97	6.29	25.77	5.47	25.16	2.98	25.73	5.34	25.54	4.52	24.94	2.07
38	30.32	30.83	1.67	31.39	3.52	30.71	1.28	30.81	1.61	31.38	3.48	30.70	1.23
39	27.55	29.19	5.93	29.29	6.31	29.00	5.23	29.13	5.72	29.23	6.09	28.94	5.02
40	29.40	30.98	5.36	31.30	6.45	30.92	5.14	30.98	5.34	31.30	6.44	30.91	5.12
41	30.17	30.32	0.52	30.60	1.43	30.25	0.28	30.32	0.50	30.59	1.41	30.24	0.26
42	24.49	22.84	6.74	22.56	7.90	22.78	6.99	22.81	6.84	22.53	8.01	22.75	7.10
43	26.72	25.26	5.47	24.04	10.04	25.06	6.22	25.18	5.77	23.94	10.39	24.97	6.54
44	21.70	23.55	8.51	22.81	5.10	23.40	7.84	23.50	8.29	22.77	4.91	23.36	7.63
45	23.33	26.68	14.35	26.85	15.10	26.12	11.97	26.53	13.73	26.71	14.49	25.97	11.33
46	26.98	29.63	9.82	29.81	10.47	29.54	9.48	29.62	9.77	29.79	10.41	29.53	9.43
47	24.21	27.60	13.98	27.75	14.61	27.20	12.35	27.50	13.58	27.65	14.20	27.11	11.96
48	26.28	29.40	11.87	29.68	12.91	28.94	10.10	29.31	11.49	29.59	12.56	28.83	9.70
49	24.12	25.83	7.05	25.95	7.58	25.72	6.63	25.80	6.96	25.93	7.49	25.70	6.54
50	25.37	26.47	4.35	26.68	5.15	26.45	4.25	26.46	4.32	26.67	5.12	26.44	4.22
51	27.58	30.02	8.84	30.64	11.07	29.76	7.91	29.96	8.64	30.59	10.92	29.71	7.70
52	28.12	29.86	6.19	30.36	7.97	29.62	5.32	29.81	6.00	30.31	7.80	29.56	5.12
53	26.25	27.71	5.55	27.80	5.89	27.71	5.56	27.71	5.54	27.80	5.88	27.71	5.55
54	26.22	27.71	5.69	27.68	5.58	27.61	5.29	27.67	5.54	27.64	5.42	27.57	5.15
55	28.42	30.24	6.40	30.17	6.15	30.17	6.14	30.23	6.36	30.16	6.11	30.16	6.10
56	28.23	31.77	12.53	31.79	12.60	31.77	12.53	31.77	12.52	31.79	12.59	31.77	12.53
57	22.92	26.62	16.14	26.68	16.40	25.81	12.62	26.41	15.20	26.47	15.47	25.60	11.68
58	26.23	28.89	10.15	29.11	10.98	28.70	9.44	28.84	9.96	29.06	10.78	28.65	9.24
59	29.33	30.62	4.39	30.94	5.48	30.53	4.09	30.60	4.33	30.93	5.45	30.51	4.03
60	29.29	30.28	3.38	30.32	3.51	30.17	3.01	30.25	3.29	30.29	3.42	30.14	2.92
61	27.29	27.75	1.70	27.71	1.55	27.67	1.39	27.73	1.61	27.69	1.47	27.64	1.31

62	22.32	24.13	8.08	24.10	7.96	23.86	6.87	24.05	7.72	24.02	7.59	23.78	6.51
63	24.36	25.27	3.75	25.26	3.69	25.23	3.58	25.26	3.72	25.25	3.67	25.22	3.56
em			7.11		7.15		6.46		6.93		6.98		6.29

N°mel	TS <sub>exp</sub>	TS <sub>har</sub> mas	e(%)	TS <sub>har</sub> mol	e(%)	TS <sub>har</sub> vol	e(%)
1	21.33	21.83	2.33	21.72	1.83	21.80	2.21
2	21.78	22.70	4.22	22.62	3.87	22.68	4.14
3	20.71	21.11	1.93	21.03	1.56	21.09	1.84
4	25.61	29.09	13.59	29.08	13.58	29.09	13.59
5	20.67	21.83	5.61	21.10	2.08	21.67	4.83
6	21.63	22.81	5.43	22.20	2.64	22.68	4.86
7	21.40	21.25	0.71	20.96	2.06	21.19	1.02
8	24.57	23.94	2.58	23.98	2.40	23.63	3.83
9	23.45	26.33	12.29	26.36	12.42	26.11	11.34
11	24.39	25.55	4.74	25.82	5.85	24.77	1.55
12	27.32	29.11	6.55	29.29	7.22	28.51	4.38
13	22.57	22.39	0.77	22.56	0.04	21.97	2.63
15	30.54	32.29	5.75	32.27	5.67	32.29	5.75
16	29.62	31.74	7.16	31.72	7.08	31.74	7.16
17	30.35	30.82	1.54	30.86	1.68	30.75	1.29
18	26.36	28.70	8.87	28.74	9.04	28.63	8.62
19	27.39	29.91	9.21	29.98	9.46	29.80	8.82
20	21.94	24.00	9.36	23.54	7.28	23.94	9.09
21	23.35	24.51	4.96	24.53	5.02	24.45	4.71
22	22.71	24.00	5.68	24.01	5.74	23.95	5.47
23	25.36	26.85	5.88	26.73	5.41	26.46	4.31
24	23.81	25.46	6.91	24.90	4.57	24.73	3.87
25	26.09	28.56	9.46	28.46	9.07	28.40	8.87
26	21.96	22.98	4.66	22.80	3.83	22.77	3.69
27	18.44	21.30	15.47	21.04	14.08	21.24	15.14
28	23.63	24.16	2.22	23.96	1.36	24.14	2.16
29	24.79	26.56	7.14	27.09	9.26	26.14	5.42
30	30.90	31.40	1.61	31.43	1.70	31.40	1.61
31	24.38	28.74	17.88	29.06	19.18	28.55	17.12
32	20.52	24.05	17.19	23.63	15.18	24.00	16.95
33	25.78	26.33	2.14	26.12	1.33	26.30	2.02
34	25.11	26.71	6.37	26.43	5.22	26.72	6.41
35	26.34	26.74	1.50	26.41	0.26	26.74	1.51
36	26.58	27.88	4.90	28.08	5.64	27.42	3.15
37	24.43	25.05	2.55	24.86	1.77	24.30	0.53
38	30.32	30.77	1.45	31.34	3.34	30.65	1.07
39	27.55	28.95	5.06	29.05	5.44	28.76	4.37
40	29.40	30.96	5.28	31.29	6.41	30.89	5.05
41	30.17	30.30	0.44	30.58	1.36	30.22	0.19
42	24.49	22.74	7.16	22.45	8.32	22.67	7.42
43	26.72	24.92	6.73	23.67	11.42	24.71	7.53
44	21.70	23.36	7.64	22.65	4.36	23.22	6.99
45	23.33	26.08	11.82	26.26	12.57	25.52	9.39
46	26.98	29.58	9.62	29.74	10.23	29.49	9.29

47	24.21	27.22	12.41	27.36	13.01	26.83	10.83
48	26.28	29.00	10.32	29.30	11.46	28.50	8.44
49	24.12	25.73	6.68	25.86	7.20	25.63	6.25
50	25.37	26.44	4.23	26.65	5.03	26.42	4.13
51	27.58	29.79	8.02	30.46	10.44	29.53	7.05
52	28.12	29.64	5.41	30.17	7.29	29.39	4.50
53	26.25	27.70	5.51	27.79	5.85	27.70	5.51
54	26.22	27.56	5.12	27.52	4.97	27.47	4.75
55	28.42	30.20	6.24	30.12	5.97	30.12	5.98
56	28.23	31.76	12.51	31.78	12.58	31.76	12.51
57	22.92	25.76	12.37	25.82	12.65	24.97	8.93
58	26.23	28.68	9.36	28.90	10.19	28.50	8.66
59	29.33	30.55	4.16	30.90	5.34	30.46	3.84
60	29.29	30.17	3.01	30.21	3.13	30.05	2.61
61	27.29	27.66	1.37	27.63	1.24	27.58	1.07
62	22.32	23.80	6.62	23.77	6.47	23.53	5.42
63	24.36	25.24	3.64	25.23	3.58	25.20	3.47
em			<b>6.42</b>		<b>6.46</b>		<b>5.82</b>

Les écarts moyens obtenus entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales sont regroupés dans le tableau suivant.

composition	mass (%)			mol (%)			vol (%)		
	bin	ter	som	bin	ter	som	bin	ter	som
<b>mélange</b>									
<b><math>e_{\text{moy}}</math> (%) arithmétique</b>	7.02	8.28	<b>7.47</b>	6.73	8.85	<b>7.49</b>	6.34	7.59	<b>6.79</b>
<b><math>e_{\text{moy}}</math> (%) géométrique</b>	6.73	8.03	<b>7.20</b>	6.46	8.61	<b>7.24</b>	6.09	7.34	<b>6.54</b>
<b><math>e_{\text{moy}}</math> (%) cubique</b>	6.64	7.95	<b>7.11</b>	6.37	8.53	<b>7.15</b>	6.01	7.25	<b>6.46</b>
<b><math>e_{\text{moy}}</math> (%) logarithmique</b>	6.45	7.78	<b>6.93</b>	6.19	8.37	<b>6.98</b>	5.85	7.08	<b>6.29</b>
<b>harmonique</b>	5.93	7.27	<b>6.42</b>	5.66	7.88	<b>6.46</b>	5.40	6.57	<b>5.82</b>

Tableau 9 : comparaison entre les tensions superficielles calculées et celles mesurées.

Les écarts enregistrés entre les règles de mélanges et l'expérience tournent autour de 7%. Ces écarts, relativement élevés, peuvent s'expliquer par le fait que pour effectuer le calcul nous avons considéré la composition du liquide et non pas celle de sa surface d'une part, et d'autre part à la non idéalité des mélanges considérés qui sont caractérisés par la présence de grandeurs d'excès que nous n'avons pas pris en considération pour effectuer le calcul des tensions superficielle moyennes.

- **Le point d'aniline :**

N°mel	PA <sub>exp</sub>	PA <sub>ar</sub> mas	e(%)	PA <sub>ar</sub> mol	e(%)	PA <sub>ar</sub> vol	e(%)	PA <sub>ge</sub> mas	e(%)	PA <sub>ge</sub> mol	e(%)	PA <sub>ge</sub> vol	e(%)
1	68	65.6	3.57	65.39	3.84	65.53	3.63	65.55	3.60	65.36	3.88	65.36	3.88
2	67.8	67.0	1.15	66.89	1.34	66.99	1.19	67.00	1.17	66.88	1.36	66.88	1.36
3	67.6	64.3	4.90	64.15	5.11	64.25	4.95	64.27	4.93	64.13	5.13	64.13	5.13
5	70.8	68.5	3.27	65.71	7.19	67.88	4.12	68.12	3.79	65.50	7.48	65.50	7.48

6	71.2	69.6	2.27	68.04	4.44	69.27	2.71	69.44	2.47	67.91	4.62	67.91	4.62
7	68.8	65.4	4.88	64.60	6.10	65.25	5.16	65.35	5.01	64.54	6.19	64.54	6.19
8	47.2	45.5	3.57	45.33	3.97	46.84	0.76	44.10	6.57	43.91	6.96	43.91	6.96
9	35.4	36.3	2.40	36.14	2.10	37.04	4.63	35.45	0.14	35.36	0.13	35.36	0.13
10	59.2	56.0	5.45	55.84	5.67	56.84	3.99	55.00	7.09	54.86	7.33	54.86	7.33
21	49.6	48.5	2.31	48.36	2.51	48.84	1.54	47.96	3.30	47.86	3.50	47.86	3.50
22	52.4	51.9	0.92	51.83	1.10	52.26	0.27	51.47	1.78	51.37	1.96	51.37	1.96
26	52.4	52.7	0.48	53.57	2.23	53.73	2.53	51.70	1.33	52.62	0.42	52.62	0.42
27	68.6	68.8	0.25	68.40	0.29	68.69	0.13	68.75	0.22	68.38	0.31	68.38	0.31
28	68.2	67.0	1.73	65.58	3.84	66.91	1.89	66.76	2.11	65.33	4.21	65.33	4.21
33	80	79.0	1.27	78.19	2.27	78.87	1.41	78.88	1.40	78.10	2.38	78.10	2.38
35	55.8	51.9	7.00	46.42	16.81	51.97	6.86	50.00	10.40	45.18	19.03	45.18	19.03
42	69.8	68.08	2.47	67.41	3.42	67.93	2.68	68.01	2.56	67.35	3.51	67.87	2.77
49	45.2	44.97	0.52	44.07	2.50	45.85	1.44	43.74	3.24	42.86	5.18	44.57	1.38
50	51.4	48.31	6.00	44.34	13.74	48.86	4.94	46.50	9.53	42.79	16.75	47.02	8.52
62	48	46.53	3.07	46.63	2.86	47.67	0.69	45.40	5.43	45.46	5.28	46.52	3.08
63	62	58.96	4.91	56.56	8.77	59.49	4.05	57.66	7.00	55.27	10.85	58.22	6.10
em			2.97		4.77		2.84		3.96		5.55		4.61

N°mel	PA <sub>exp</sub>	PA <sub>cu,mas</sub>	e(%)	PA <sub>cub,mol</sub>	e(%)	PA <sub>cub,vol</sub>	e(%)	PA <sub>io,mas</sub>	e(%)	PA <sub>log,mol</sub>	e(%)	Mlog(vol)	e(%)
1	68	65.54	3.61	65.36	3.89	65.50	3.68	65.53	3.64	65.34	3.91	65.48	3.70
2	67.8	67.00	1.18	66.87	1.37	66.97	1.22	66.99	1.20	66.86	1.38	66.96	1.24
3	67.6	64.26	4.94	64.12	5.14	64.23	4.99	64.25	4.96	64.11	5.16	64.22	5.01
5	70.8	68.00	3.96	65.44	7.57	67.44	4.74	67.77	4.28	65.31	7.75	67.24	5.03
6	71.2	69.40	2.53	67.86	4.69	69.08	2.97	69.30	2.66	67.77	4.81	68.99	3.10
7	68.8	65.32	5.05	64.52	6.22	65.14	5.32	65.27	5.14	64.48	6.28	65.09	5.40
8	47.2	43.63	7.56	43.45	7.95	44.94	4.79	42.71	9.50	42.54	9.88	43.99	6.80
9	35.4	35.21	0.54	35.12	0.79	35.88	1.35	34.77	1.79	34.68	2.02	35.38	0.05
10	59.2	54.65	7.69	54.50	7.94	55.63	6.03	53.89	8.96	53.74	9.23	54.94	7.20
21	49.6	47.80	3.63	47.70	3.83	48.18	2.87	47.47	4.29	47.37	4.49	47.85	3.54
22	52.4	51.31	2.08	51.22	2.26	51.67	1.40	51.00	2.68	50.90	2.86	51.36	1.99
26	52.4	51.39	1.93	52.30	0.19	52.46	0.12	50.76	3.12	51.67	1.40	51.83	1.10
27	68.6	68.75	0.21	68.38	0.32	68.66	0.09	68.73	0.19	68.37	0.34	68.65	0.07
28	68.2	66.67	2.24	65.25	4.33	66.57	2.39	66.50	2.49	65.08	4.57	66.40	2.64
33	80	78.85	1.44	78.07	2.42	78.73	1.58	78.78	1.53	78.01	2.49	78.67	1.66
35	55.8	49.42	11.44	44.82	19.68	49.48	11.32	48.34	13.38	44.16	20.86	48.40	13.26
42	69.8	67.99	2.59	67.33	3.54	67.85	2.80	67.95	2.65	67.29	3.59	67.80	2.86
49	45.2	43.34	4.11	42.47	6.04	44.16	2.30	42.59	5.78	41.73	7.67	43.37	4.06
50	51.4	45.92	10.66	42.31	17.68	46.43	9.67	44.81	12.82	41.42	19.42	45.29	11.89
62	48	45.02	6.21	45.08	6.09	46.14	3.88	44.28	7.76	44.31	7.68	45.37	5.47
63	62	57.22	7.71	54.84	11.55	57.78	6.81	56.32	9.15	53.98	12.94	56.90	8.23
em			4.35		5.88		3.82		5.14		6.61		4.49

N°mcl	PA (K)	PA <sub>har</sub> mas	e(%)	PA <sub>har</sub> mol	e(%)	PA <sub>har</sub> vol	e(%)
1	68	65.48	3.71	65.29	3.98	65.44	3.77
2	67.8	66.96	1.24	66.83	1.43	66.93	1.29
3	67.6	64.21	5.01	64.08	5.21	64.18	5.06
5	70.8	67.15	5.15	64.99	8.21	66.68	5.82
6	71.2	69.03	3.05	67.51	5.18	68.71	3.49
7	68.8	65.11	5.37	64.37	6.44	64.94	5.62
8	47.2	40.19	14.86	40.03	15.19	41.32	12.46
9	35.4	33.72	4.75	33.66	4.93	34.19	3.43
10	59.2	51.30	13.35	51.12	13.65	52.50	11.32
21	49.6	46.52	6.20	46.43	6.39	46.88	5.48
22	52.4	50.02	4.55	49.92	4.73	50.39	3.83
26	52.4	48.97	6.54	49.82	4.92	49.97	4.63
27	68.6	68.69	0.13	68.34	0.39	68.61	0.01
28	68.2	65.99	3.24	64.61	5.27	65.89	3.39
33	80	78.58	1.78	77.85	2.69	78.47	1.91
35	55.8	45.75	18.00	42.68	23.52	45.80	17.92
42	69.8	67.82	2.84	67.17	3.77	67.68	3.04
49	45.2	40.58	10.23	39.80	11.94	41.23	8.79
50	51.4	41.93	18.43	39.19	23.75	42.32	17.67
62	48	42.17	12.15	42.14	12.21	43.16	10.08
63	62	53.66	13.45	51.49	16.95	54.23	12.53
em			<b>7.33</b>		<b>8.61</b>		<b>6.74</b>

Un résumé des écarts enregistrés est donné dans le **tableau 10**:

composition	mass (%)			mol (%)			vol (%)		
	bin	ter	som	bin	ter	som	bin	ter	som
<b>e<sub>moy</sub> (%) arithmétique</b>	2.84	3.39	<b>2.97</b>	4.30	6.26	<b>4.77</b>	2.86	2.76	<b>2.84</b>
<b>e<sub>moy</sub> (%) géométrique</b>	3.46	5.55	<b>3.96</b>	4.68	8.31	<b>5.55</b>	4.68	4.37	<b>4.61</b>
<b>e<sub>moy</sub> (%) cubique</b>	3.75	6.26	<b>4.35</b>	4.91	8.98	<b>5.88</b>	3.43	5.09	<b>3.82</b>
<b>e<sub>moy</sub> (%) logarithmique</b>	4.36	7.63	<b>5.14</b>	5.46	10.26	<b>6.61</b>	3.86	6.50	4.49
<b>e<sub>moy</sub> (%) harmonique</b>	6.06	11.42	<b>7.33</b>	7.01	13.72	<b>8.61</b>	5.59	10.42	6.74

**Tableau 10:** Comparaison entre les points d'anilines calculées et ceux mesurés.

D'après les résultats obtenus, il semble que l'additivité s'applique assez bien à cette propriété. En effet les écarts obtenus par rapport à l'expérience montrent que ceux-ci sont acceptables pour les différentes règles de mélanges, cependant la moyenne harmonique est celle qui a donnée les plus grandes déviations (8.61%) en pourcentages molaires.

Les meilleurs résultats correspondants aux plus faibles écarts sont obtenus en utilisant la moyenne arithmétique aussi bien en pourcentages massiques que volumiques.

### 3.2 Par les corrélations de la littérature :

Moyennant des corrélations de la littérature, nous avons procédé au calcul des propriétés étudiées et comparé les résultats à ceux obtenus par les règles classiques d'une part et par l'expérience d'autre part.

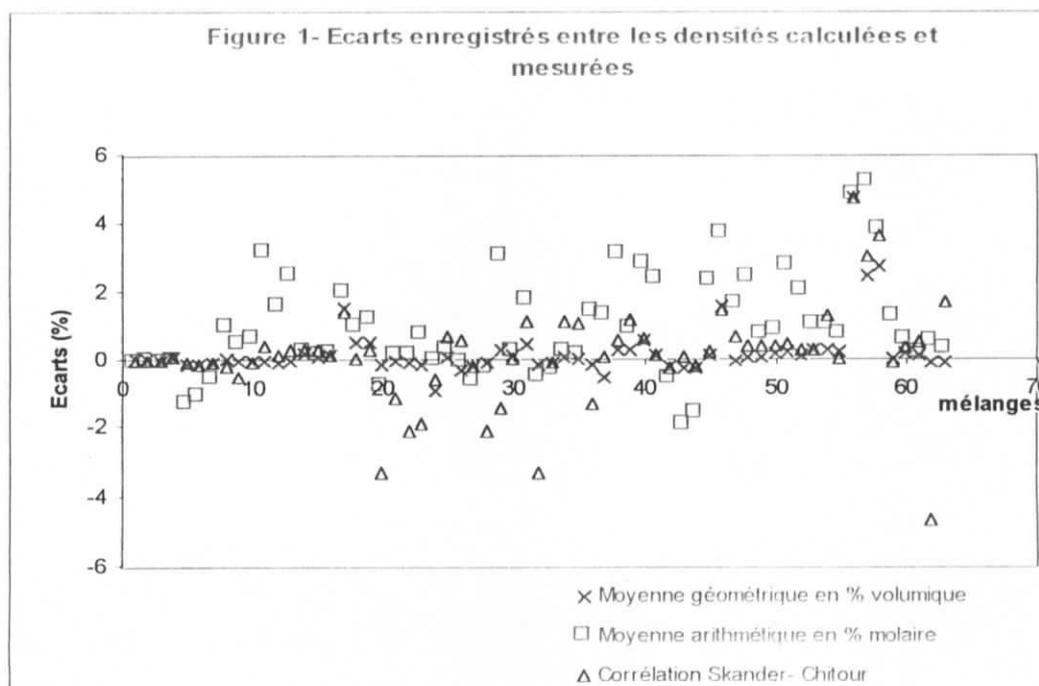
- **La densité :**

Pour cette propriété, la corrélation de Skander-Chitour a été utilisée.

composition	Ecart moyen en % massique	Ecart moyen en % molaire	Ecart moyen en % volumique
<b>Moyenne arithmétique</b>	0.83	1.25	0.42
<b>Moyenne géométrique</b>	0.72	1.17	0.35
<b>Moyenne cubique</b>	0.68	1.15	0.38
<b>Moyenne logarithmique</b>	0.60	1.09	0.40
<b>Moyenne harmonique</b>	1.18	0.96	0.53
<b>Corr. Skander-Chitour</b>	1.12	1.57	0.87

**Tableau 11** :Ecart moyen enregistré par la corrélation de Skander-Chitour.

Les résultats obtenus par cette méthode sont proches de ceux obtenus par l'expérience et par les règles classiques, l'écart est de l'ordre de 2%. Le meilleur résultat est celui obtenu en utilisant les compositions en pourcentages volumiques. Dans la figure1, nous avons illustré les écarts enregistrés par la corrélation de Skander- Chitour et des deux règles de mélanges ayant donné le plus faible et le plus élevé écart moyen.



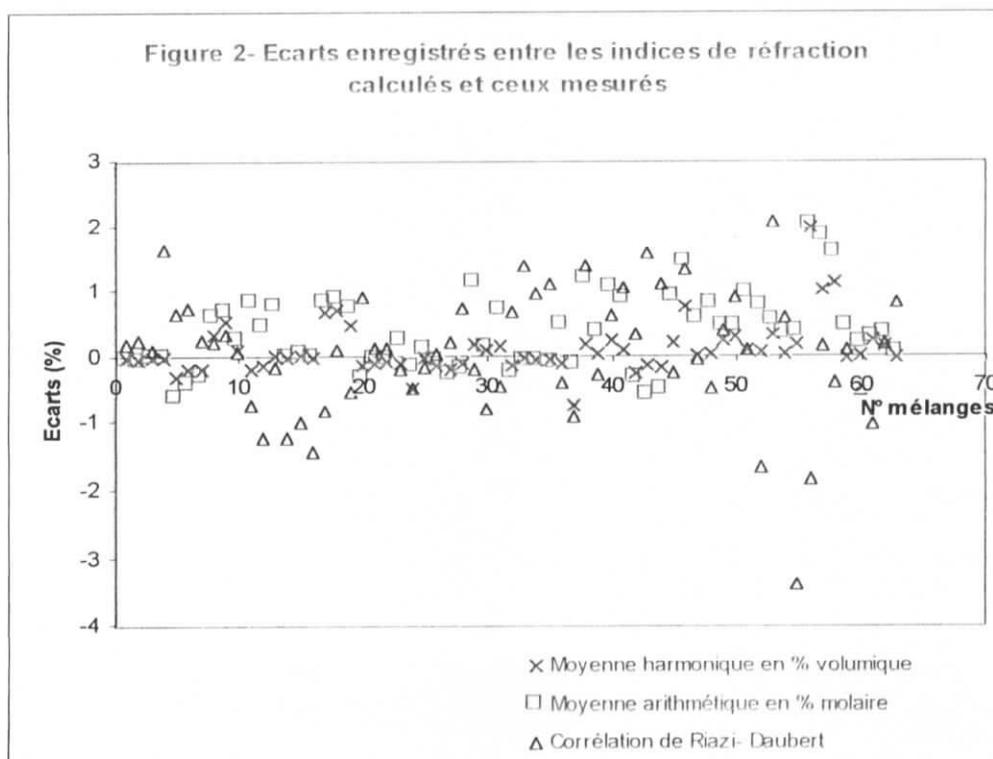
• L'indice de réfraction :

Pour l'indice de réfraction, nous avons appliqué la corrélation de Riazi-Daubert donnant l'indice de corrélation I. Les résultats obtenus sont portés dans le **tableau 12**.

composition	Ecart moyen en % massique	Ecart moyen en % molaire	Ecart moyen en % volumique
Moyenne arithmétique	0.34	0.50	0.25
Moyenne géométrique	0.34	0.49	0.27
Moyenne cubique	0.42	0.49	0.24
Moyenne logarithmique	0.33	0.48	0.24
Moyenne harmonique	0.3	0.47	0.23
Corr. Riazi-Daubert	0.69		

**Tableau 12:** Les écarts moyen enregistrés par la corrélation de Riazi-Daubert..

Pour cette corrélation, l'indice de réfraction est calculé en fonction de la température d'ébullition, la masse molaire et la densité des mélanges. L'erreur moyenne de tous les mélanges est de l'ordre de 0.7%, soit légèrement supérieur à celle obtenue par les règles de mélanges. Dans la figure2, nous avons illustré les écarts enregistrés par la corrélation de Riazi- Daubert et des deux règles de mélanges ayant donné le plus faible et le plus élevé écart moyen.



• **La viscosité :**

Pour la viscosité, deux corrélations ont été étudiées, à savoir la corrélation de Beg-Amin-Hussein et celle proposée par Mehotra

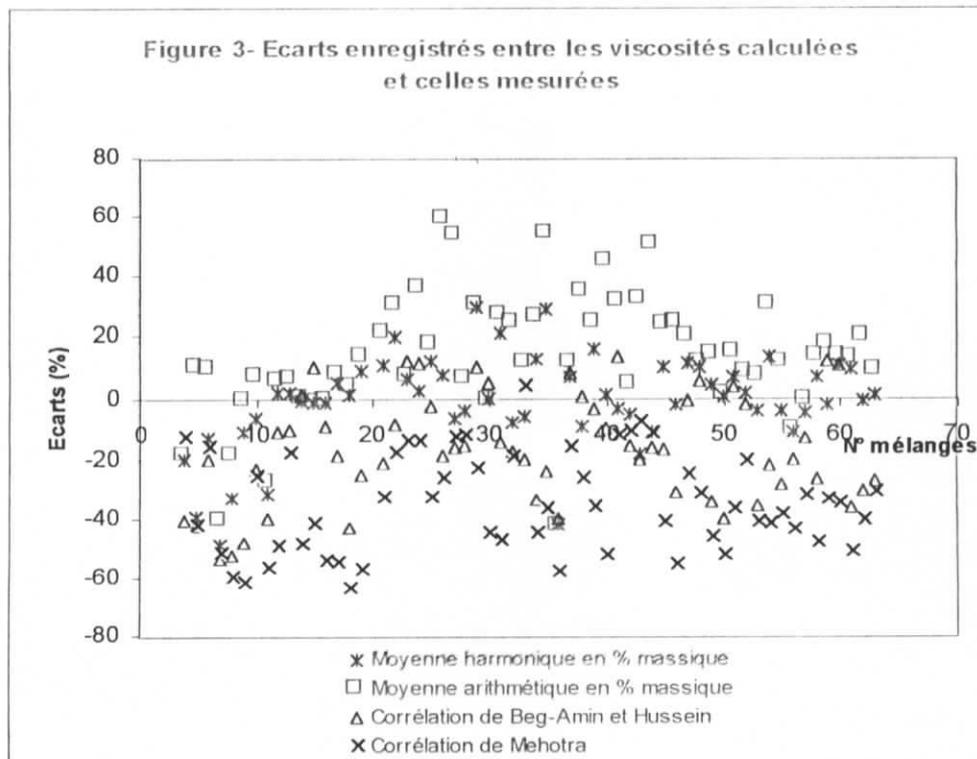
Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 13:

composition	Ecart moyen en % massique	Ecart moyen en % molaire	Ecart moyen en % volumique
<b>Moyenne arithmétique</b>	17.37	12.60	17.31
<b>Moyenne géométrique</b>	14.27	11.06	14.40
<b>Moyenne cubique</b>	13.40	11.01	13.52
<b>Moyenne logarithmique</b>	15.92	11.30	12.04
<b>Moyenne harmonique</b>	10.49	12.03	10.67
<b>Corr.Beg-Amin-Hussein</b>		19.98	
<b>Corr.Mehotra</b>		34.42	

**Tableau 13** Ecarts moyens enregistrés par les corrélations de Beg-Amin-Hussein et Mehotra.

On remarque pour ces deux corrélations que la déviation est assez importante, elle est de l'ordre de 20% pour la corrélation de Beg-Amin-Hussein et de l'ordre de 35% pour Mehotra. Ces écarts sont par ailleurs plus élevés que ceux obtenus par les règles de mélanges. Ceci peut être dû aux valeurs

moyennes des paramètres de ces équations qui ont été calculés par simple pondération. Dans la figure3, nous avons illustré les écarts enregistrés par les corrélations de Beg- Amin et Mehotra et des deux règles de mélanges ayant donné le plus faible et le plus élevé écart moyen.



- **La tension superficielle :**

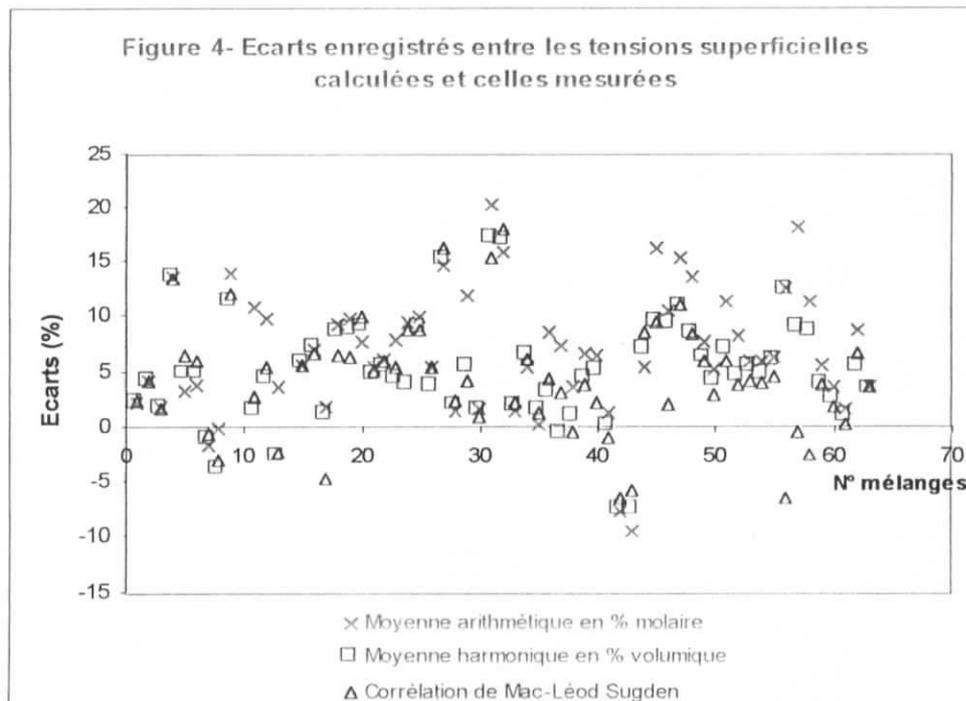
L'application de la corrélation de Macleod-Sudgen sur les mélanges préparés a donnée les résultats suivant :

composition	Ecart moyen en % massique	Ecart moyen en % molaire	Ecart moyen en % volumique
<b>Moyenne arithmétique</b>	7.47	7.49	6.79
<b>Moyenne géométrique</b>	7.20	7.24	6.54
<b>Moyenne cubique</b>	7.11	7.15	6.46
<b>Moyenne logarithmique</b>	6.93	6.98	6.29
<b>Moyenne harmonique</b>	6.42	6.46	5.82
<b>Corr. Macleode-Sudgen</b>	5.43	5.69	6.42

**Tableau14:** Ecarts enregistrés entre les tensions superficielles mesurées et celles calculées par la méthode de Macleod-Sudgen.

Les écarts enregistrés par cette méthode par rapport à l'expérience sont de même ordre de grandeur que ceux obtenus avec les règles de mélanges classiques.

Les écarts obtenus sont de l'ordre de 6%. Dans la figure4, nous avons illustré les écarts enregistrés par la corrélation de Macleod-Sudgen et des deux règles de mélanges ayant donné le plus faible et le plus élevé écart moyen.



- **Le point d'aniline :**

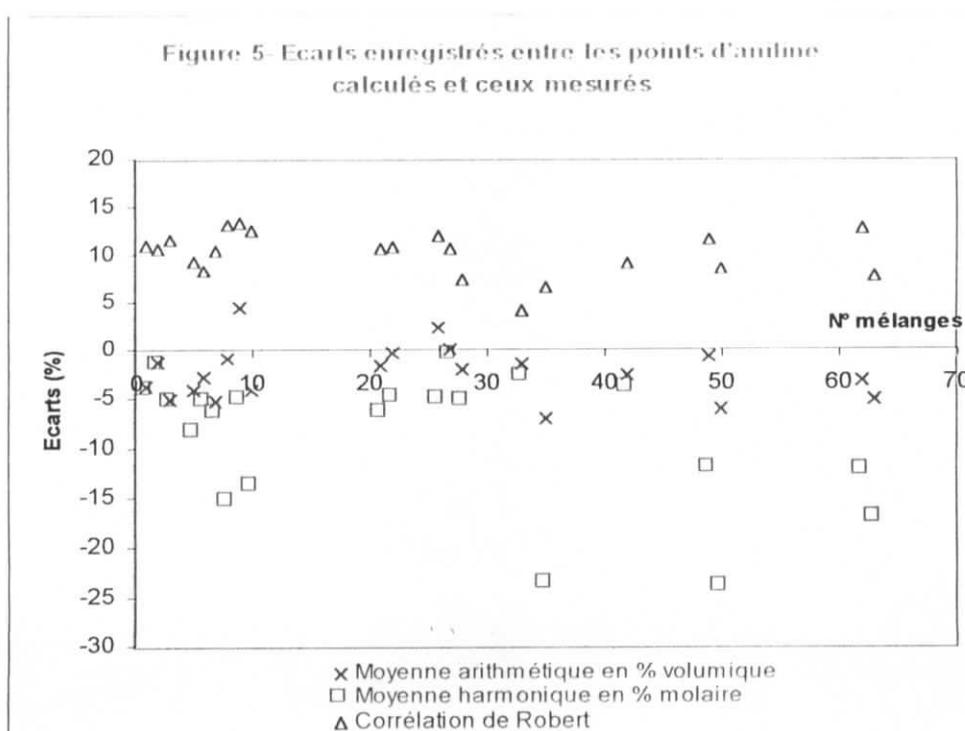
Le point d'aniline a été calculé en utilisant les corrélations proposées par Walch-Mortimer et Robert.

Les résultats de calcul sont données dans le tableau 15.

composition	Ecart moyen en % massique	Ecart moyen en % molaire	Ecart moyen en % volumique
Moyenne arithmétique	2.97	4.77	2.84
Moyenne géométrique	3.96	5.55	4.61
Moyenne cubique	4.35	5.88	3.82
Moyenne logarithmique	5.14	6.61	4.49
Moyenne harmonique	7.33	8.61	6.74
Corr.Robert		9.43	
Corr.Walsh		10.76	

Tableau 15 : Ecart enregistré entre les points d'anilines mesurés et ceux calculés par les méthodes Rober et Walch.

Les résultats obtenus par ces deux corrélations sont relativement élevés, 11.70% par la méthode de Walch et 9.15% par Robert. Les règles de mélanges classiques ont donné de faibles écarts. Dans la figure5, nous avons illustré les écarts enregistrés par la corrélation de Robert et des deux règles de mélanges ayant donné le plus faible et le plus élevé écart moyen.



#### 4. ETABLISSEMENT DE NOUVELLES REGLES DE MELANGES

L'application des règles de mélanges classiques pour le calcul des propriétés moyennes ( $d_4^{20}$ ,  $n_D^{20}$ ,  $v$ , TS et PA) des mélanges simples (binaires et ternaires) a fourni des écarts par rapport à l'expérience qui sont parfois assez importants, en particulier dans le cas de la viscosité cinématique et de la tension superficielle. Ces déviations sont dus essentiellement aux écarts par rapport à la non-idéalité des mélanges traités.

Dans cette partie, nous nous sommes proposés d'améliorer les règles de mélanges classiques en introduisant des termes correctifs dans ces mêmes équations, le but étant de réduire au maximum les écarts enregistrés par rapport aux valeurs expérimentales. Les termes correctifs qui ont été introduit tiennent compte uniquement de la nature des hydrocarbures présents dans les mélanges, à savoir les paraffines, les naphthènes et les aromatiques.

Pour réaliser cette étape, nous nous sommes limités aux deux propriétés qui ont enregistré des écarts élevés par rapport à l'expérience, en l'occurrence la viscosité et la tension superficielle, le point d'aniline quant à lui n'a pu être traité vu le nombre restreint de données expérimentales disponibles.

##### 4.1 Méthode adoptée :

L'établissement des nouvelles règles de mélanges a consisté à effectuer des opérations de régression de type multilinéaires moyennant un logiciel d'optimisation SIGMAPLOT. A partir des valeurs expérimentales des propriétés des mélanges binaires et ternaires et des valeurs des propriétés expérimentales des différents corps purs et de leurs compositions (%massiques, %molaires et %volumiques, nous avons établi des équations de type :

$$* \text{ Cas de la moyenne arithmétique : } P_{\text{mel}} = C_P \cdot P_P X_P + C_N \cdot P_N X_N + C_A \cdot P_A X_A \quad (1)$$

$$* \text{ Cas de la moyenne géométrique : } P_{\text{mel}}^{1/2} = C_P \cdot P_P^{1/2} X_P + C_N \cdot P_N^{1/2} X_N + C_A \cdot P_A^{1/2} X_A \quad (2)$$

$$* \text{ Cas de la moyenne cubique : } P_{\text{mel}}^{1/3} = C_P \cdot P_P^{1/3} X_P + C_N \cdot P_N^{1/3} X_N + C_A \cdot P_A^{1/3} X_A \quad (3)$$

$$* \text{ Cas de la moyenne géométrique : } \log P_{\text{mel}} = C_P \cdot \log P_P \cdot X_P + C_N \cdot \log P_N \cdot X_N + C_A \cdot \log P_A \cdot X_A \quad (4)$$

$$* \text{ Cas de la moyenne harmonique : } P_{\text{mel}}^{-1} = C_P \cdot P_P^{-1} X_P + C_N \cdot P_N^{-1} X_N + C_A \cdot P_A^{-1} X_A \quad (5)$$

où :

$P_{\text{mel}}$  : propriété moyenne du mélange.

$P_P$  : propriété moyenne de l'hydrocarbure paraffinique.

$P_N$  : propriété moyenne de l'hydrocarbure naphthénique.

$P_A$  : propriété moyenne de l'hydrocarbure aromatique.

$X_P$  : % massique, molaire ou volumique de l'hydrocarbure paraffinique.

$X_N$  : % massique, molaire ou volumique de l'hydrocarbure naphthénique.

$X_A$  : % massique, molaire ou volumique de l'hydrocarbure aromatique.

$C_P$  : coefficient caractéristique de la famille des paraffines.

$C_N$  : coefficient caractéristique de la famille des naphthènes.

$C_A$  : coefficient caractéristique de la famille des aromatiques.

#### 4.2 Résultats et commentaires :

La régression à partir des données expérimentales, a permis de déterminer les valeurs des coefficients  $C_P$ ,  $C_N$  et  $C_A$ . Leurs valeurs sont données dans les tableaux 16 et 17 pour la viscosité et la tension superficielle respectivement :

	coefficients	%massique	%molaire	%volumique
Moyenne arithmétique	CP	0.946	1.083	0.949
	CN	0.806	0.820	0.805
	CA	0.921	0.943	0.905
Moyenne géométrique	CP	1.014	1.068	1.017
	CN	0.895	0.913	0.894
	CA	0.959	0.980	0.947
Moyenne cubique	CP	1.018	1.050	1.020
	CN	0.929	0.943	0.928
	CA	0.974	0.989	0.965
Moyenne logarithmique	CP	1.122	1.165	1.107
	CN	-0.670	-0.075	-0.656
	CA	1.149	0.956	1.214
Moyenne harmonique	CP	0.845	0.817	0.838
	CN	1.185	1.111	1.190
	CA	1.013	0.983	1.028

Tableau 16 : Coefficients des nouvelles règles pour la viscosité.

	coefficients	%massique	%molaire	%volumique
Moyenne arithmétique	CP	0.952	0.962	0.958
	CN	0.928	0.931	0.930
	CA	0.924	0.918	0.933
Moyenne géométrique	CP	0.977	0.982	0.980
	CN	0.964	0.965	0.965
	CA	0.963	0.959	0.968
Moyenne cubique	CP	0.975	0.977	0.977
	CN	0.976	0.977	0.976
	CA	0.976	0.973	0.979
Moyenne logarithmique	CP	0.986	0.989	0.988
	CN	0.978	0.979	0.978
	CA	0.979	0.977	0.982
Moyenne harmonique	CP	1.033	1.026	1.025
	CN	1.044	1.036	1.043
	CA	1.066	1.078	1.057

Tableau 17 : Coefficient des nouvelles règles pour la tension superficielle.

Ces coefficients ont été utilisés par la suite pour calculer les propriétés moyennes des différents mélanges en utilisant les nouvelles règles de mélanges( équations 1, 2, 3, 4 et 5 ).

Les résultats obtenus nous ont permis d'évaluer les écarts moyens enregistrés par ces équations par rapport à l'expérience. Ces écarts sont regroupés dans les tableaux 17 et 18 pour la viscosité et la tension superficielle respectivement.

Ecart moyen en %	$e_m$ % massique	$e_m$ % massique- corrigé	$e_m$ % molaire	$e_m$ % molaire- corrigé	$e_m$ % volumique	$e_m$ % volumique- corrigé
Moyenne arithmétique	17.37	11.49	12.60	10.80	17.31	11.79
Moyenne géométrique	14.27	11.17	11.06	10.70	14.40	11.55
Moyenne cubique	13.40	11.09	11.01	10.70	13.52	11.42
Moyenne logarithmique	15.92	9.03	11.30	9.64	12.04	9.45
Moyenne harmonique	10.49	10.58	12.03	12.59	10.67	10.42

**Tableau 18** : correction de la viscosité

Ecart moyen en %	$e_m$ % massique	$e_m$ % massique- corrigé	$e_m$ % molaire	$e_m$ % molaire- corrigé	$e_m$ % volumique	$e_m$ % volumique- corrigé
Moyenne arithmétique	7.47	3.64	7.49	3.66	6.79	3.34
Moyenne géométrique	7.20	3.53	7.24	3.60	6.54	3.29
Moyenne cubique	7.11	3.49	7.15	3.58	6.46	3.28
Moyenne logarithmique	6.93	3.43	6.98	3.54	6.29	3.25
Moyenne harmonique	6.42	4.57	6.46	4.45	5.82	4.51

**Tableau 19** : Ecarts moyens enregistrés dans le cas de la viscosité par les règles classiques corrigées.

D'après les deux tableaux précédents, nous avons amélioré la prédiction des deux propriétés par l'introduction des facteurs correctifs tenant compte de la famille d'hydrocarbure, en particulier dans le cas de la tension superficielle pour laquelle les écarts moyens ont été réduits presque de moitié.

Ces écarts peuvent probablement être réduits encore plus si l'on tient compte d'autres facteurs tels que la taille des molécules mais que nous n'avons pas étudié dans le cadre de cette étude par manque d'hydrocarbures purs variés (légers, moyens et lourds).

## CONCLUSION

En conclusion, notre travail est une contribution à l'étude des propriétés physiques des mélanges d'hydrocarbures. Ainsi, sur la base d'une banque de données expérimentale, nous avons testé différentes règles de mélanges sur cinq propriétés différentes (densité, indice de réfraction, tension superficielle, viscosité cinématique et point d'aniline) et comparé les résultats de calcul à ceux obtenus par expérience ou par d'autres méthodes de calcul proposées dans la littérature.

Les différents calculs nous ont permis de confirmer la propriété d'additivité pour le calcul des densités et des indices de réfraction des mélanges. Les viscosités et les tensions superficielles ont donné des écarts élevés par rapport à l'expérience. Le point d'aniline a quant à lui donné des écarts tout à fait acceptables.

Pour réduire les écarts enregistrés dans le cas de la viscosité et de la tension superficielle, nous avons tenté d'élaborer de nouvelles règles de mélanges en affectant des coefficients propres à chaque famille d'hydrocarbure.

Les équations établies de vont être confirmées dans l'avenir sur d'autres mélanges, notamment ceux contenant des composés lourds, mais également pour des mélanges multicomposants tels que les fractions pétrolières. De même, qu'il faudrait tenir compte dans les règles de mélanges des interactions entre molécules lorsque celles-ci sont de tailles très différentes et ceci à fin de palier aux écarts dus à la non-idéalité des mélanges étudiés.

Enfin, une suite à ce projet consistera à proposer des règles de mélanges fiables pour le calcul des propriétés moyennes des mélanges complexes d'hydrocarbures.

## BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ] P. WUITHIER. le pétrole. Raffinage et génie chimique. Tome I, Edition Technip. (1972) .
- [ 2 ] A. CROZIER. Contribution aux méthodes d'analyses de fractions supérieures de pétrole. Revue de l' IFP, 11, pp 869 912, (1956).
- [ 3 ] X. NORMAND. Leçon sommaires sur l'industrie du raffinage du pétrole. Edition Technip, paris, (1976) .
- [ 4 ] V. PROSKOURIAKOV et A. DRABKINE . La chimie du pétrole et du gaz. Edition, MIR, MOUSCOU, (1981) .
- [ 5 ] Y. BERGER. Production et traitements des pétroles bruts salés. Technip, (1976) .
- [ 6 ] C.E. CHITOUR. Corrélations sur le pétrole brut et les fractions pétrolières. Office des publications universitaires ,Alger, (1982) .
- [ 7 ] PATRICK GOUAL. Etude des corrélations entre la composition des mélanges d'hydrocarbures et leurs propriétés physiques. Institut national polytechnique de Toulouse, Thèse de doctorat d'éta, (1979) .
- [8] R.C.REID, J.M.PRAUSNITZ, T.K. SHERWOOD. The properties of gases and liquids. Edition Mc Graw Hill, Newyork, (1977) .
- [ 9 ] N. TCHERKEZOFF. Essais normalisés sur les dérivés pétroliers. IAP, Juillet, (1967) .
- [10] S.E. CHITOUR. Raffinage.Tome1. Propriétés physiques des hydrocarbures et des fractions pétrolières. Office des Publications Universitaires, Alger. (1999).
- [11] P. HENRION, P. PICARD. Analyse des pétroles bruts. Institut Français du pétrole, vol 19, n°14, (1966).
- [12] H. MORGHANI. Etude analytique d'un brut Algérien de Hassi messaoud par différentes méthodes. Projet de fin d'études, génie chimique, dirigé par le Pr S.E.CHITOUR, E.N.P, (1986).
- [13] Composition et caractérisation des coupes pétrolières. ENSPM formation industrie, (1984).
- [14] M.RIAZI et T.E. DAUBERT. Prediction of molecular-type analysis of petroleum fractions and coal liquids. Ind.Eng.Chem.process Des, Dev, 1009-1015, (1986).
- [15] M.C.GOZALEZ. A.R.RODRIGUEZ. The analytical techniques used for the determination of mettalic element in crude oils and by-products. Institut Français de pétrole, vol 38, n°2, (1983).
- [16] PERRY et CHILTON. Chemical engineer's handbook. 5 th edition Mac Hill, (1973).
- [17] N.SKANDER. Thèse de magister: Contribution à la détermination des propriétés physiques des mélanges d'hydrocarbures et des fractions pétrolières par des méthodes de contribution de groupes. Directeur de thèse : C.E.Chitour, (1996).

- [18] O.DERMOUNE.Thèse de magister : Contribution à l'étude des propriétés thermodynamiques des fractions pétrolières du pétrole brut Algérien par diverses méthodes numériques. Directeur de thèse : C.E.Chitour, (1990).
- [19] F.BOUAMRA.Thèse de magister: Contribution à la détermination des propriétés physiques et chimiques des fractions pétrolières lourdes. Journal de la SAC.Vol4.n°1,13-24.
- [20] M.R.RIAZI.,T.E.DAUBERT.Ind.ERG.Chem.Process.Des.Dev.,vol.19.p289,(1980).
- [21] M.SOUDERS.J.Am.Soc.60.154,(1938).
- [22] C.ORRICK.J.H.ERBAR.Private communication. Dec.
- [23] B.ZIDELKHIER.Thèse de magister : Approche à la détermination des propriétés physiques des corps purs et des fractions pétrolières par des méthodes numériques des contributions de groupe. Directeur de thèse : C.E.Chitour, (1993).
- [24] KENDALL-MONROE.J.Am.Chem.Soc.,39,1787,(1917).
- [25] S.A.BEG.,M.B.AMIN,I.HUSSEIN.The Chemical Engineering. Journal,38,pp123-136,(1983).
- [26] Américan Pétroléum Institut.Tables: corrélation sur la viscosité.NewYork,(1992).
- [27] A.K.MEHOTRA. Corrélation and prediction of the viscosity of pure hydrocarbons,(1994).
- [28] S.SUDGEN.J.Chemical.Society.NewYork,32,(1924).
- [29] D.A.GOLDHAMMER. Phys. Chem.71,577,(1910).
- [30] J.R.BROCK,R.B.BIRD. Aiche Journal.1,174,(1955).
- [31] H.P.Meissner.A.S.Michael.Ind.and Eng.Chem.,Vol.44,(1940).
- [32] D.B.MACLEOD.Trans.Farad.Soc.19,38,(1923).
- [33] C.F.WEINAUG and D.L.KATZ.Ind.Eng.Chem.35,239,(1943).
- [34] K.S.Pedersen,A.FEDENSLUND,T.LUND.Surface Tension of Petroleum.
- [35] SANBORN et EVENS.Technical report.N°52-53R(Shell Development Compagny),(1992).
- [36] R.P.WALSH et J.V.MORTIMER.Hydrocarbon Processing.September,(1971).